Environment Canada
Environnement Canada

Ozone Depletion and Climate Change:

Canada

102-01568/

Ozone Depletion and Climate Change:

Understanding the Linkages

Angus Fergusson
Meteorological Service of Canada

Published by authority of the Minister of the Environment
Copyright © Minister of Public Works and Government Services Canada, 2001

Catalogue No. EN56-168/2001E
ISBN: 0-662-30692-9

Également disponible en français

Author: Angus Fergusson *(Environment Canada)*

Editing: David Francis *(Lanark House Communications)*
David Wardle / Jim Kerr *(Environment Canada)*

Contributing Authors: Bruce McArthur *(Environment Canada)*: Bratt Lake Observatory
David Tarasick *(Environment Canada)*: Canadian Middle Atmosphere Model
Tom McElroy *(Environment Canada)*: MANTRA Project

Special thanks for comments to: Vitali Fioletov *(Environment Canada)*
Hans Fast *(Environment Canada)*

Pictures: Angus Fergusson *(Environment Canada)*
John Bird *(Environment Canada)*
Brent Colpitts
Ray Jackson

Layout and Design: BTT Communications

Additional copies may be obtained, free of charge, from:

Angus Fergusson
Science Assessment and Integration Branch
Meteorological Service of Canada
4905 Dufferin Street
Downsview, Ontario
M3H 5T4
E-mail: Angus.Fergusson@ec.gc.ca

Table of Contents

Summary	2
Introduction	4
The Atmosphere and its Radiative Effects	6
The Dynamics of the Atmosphere	10
The Chemistry of the Atmosphere	12
Biogeochemical Linkages: The Impact of Increased UV Radiation	14
Canadian Research and Monitoring	16
Implications for Policy	20
The Research Agenda	22
Making Connections	26
Bibliography	28

Figure 1. Compared to the earth itself, the earth's atmosphere as seen from space looks remarkably thin, much like the skin on an apple. In this photograph, the two lowest layers of the atmosphere, the troposphere and the stratosphere, are clearly visible. The stratosphere is home to the ozone layer that protects life on earth from intense ultraviolet radiation. The troposphere is the layer where most weather activity takes place. The top of the thundercloud has flattened out at the tropopause, the boundary between the two layers. Interactions between the troposphere and stratosphere provide a number of important connections between ozone depletion and climate change.

Figure 1
Source: NASA

Summary

Ozone depletion and climate change have usually been thought of as environmental issues with little in common other than their global scope and the major role played in each by CFCs and other halocarbons. With increased understanding of these issues, however, has come a growing recognition that a number of very important linkages exist between them. These linkages will have some bearing on how each of these problems and the atmosphere as a whole evolve in the future.

Some of the most important of these linkages involve the way that ozone-depleting substances and greenhouse gases alter radiation processes in the atmosphere so as to enhance both global warming and stratospheric ozone depletion. These changes result in a warming of the troposphere (the bottom 8–16 km of the atmosphere) and a cooling of the stratosphere (the layer above that extends to an altitude of about 50 km and contains the ozone layer). Stratospheric cooling creates a more favourable environment for the formation of polar stratospheric clouds (PSCs), which are a key factor in the development of polar ozone holes.

Enhancement of the greenhouse effect may also be causing changes in circulation patterns in the troposphere that are, in turn, altering the circulation in the stratosphere. It is suspected that these changes are increasing the cooling forces acting on the stratosphere over the poles and are thus making the formation of ozone holes more likely. There is evidence as well that changes in the stratospheric circulation may be altering weather patterns in the troposphere. Other linkages between climate change and ozone depletion are related to the effect of increased levels of ultraviolet radiation on sun-driven chemical reactions in the atmosphere and to changes in biological processes that affect the composition of the atmosphere.

The net effect of these linkages is an intensification of both climate change and ozone depletion and possibly a delay in the recovery of the ozone layer as it responds to diminishing levels of CFCs and other ozone-depleting substances covered by the Montreal Protocol. To understand these connections better, researchers are now looking more closely at how the troposphere and stratosphere interact *(Figure 1)*. Environment Canada scientists are contributing to this research in a variety of ways, including the monitoring of ozone concentrations and solar radiation levels and collaboration in balloon-based stratospheric research and atmospheric modelling.

Both greenhouse warming and the thinning of the stratospheric ozone layer are a result of human activities that have changed the composition of the atmosphere in subtle but profound ways since the beginning of the industrial revolution more than 200 years ago. By taking an integrated approach to ozone depletion and climate change, governments and scientists will have a better chance of understanding and moderating the enormous changes that human activities have had and will continue to have on the atmosphere.

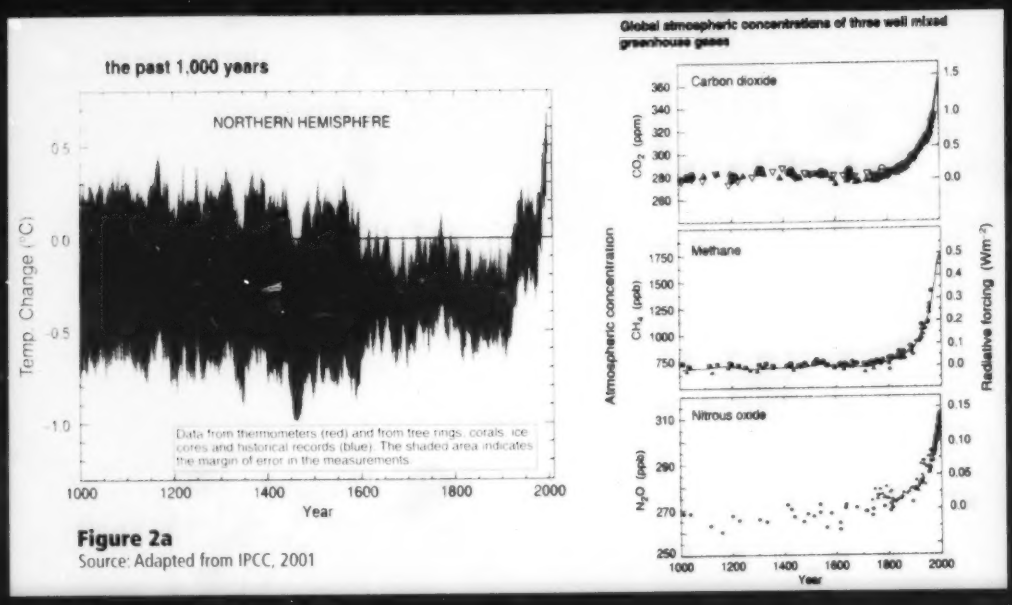


Figure 2a
Source: Adapted from IPCC, 2001

Figure 2a. Greenhouse gases, such as carbon dioxide, methane, and nitrous oxide, affect climate by retaining heat near the earth's surface. Concentrations of these gases began to rise in the 19th century and have increased exponentially in the 20th, paralleling the expansion of industrial economies and the growth of the human population. Over the past century the average global temperature has increased by about 0.6°C, and significantly greater increases are expected for the 21st century. Warming of the atmosphere is also expected to cause changes in other aspects of climate, including changes in precipitation and evaporation, circulation patterns, and weather extremes.

Figure 2b. Thinning of the stratospheric ozone layer has been caused largely by long-lived chlorine and bromine compounds, such as CFCs and halons, that eventually make their way into the stratosphere. Use of these compounds increased considerably in the 1960s and 1970s. Evidence of ozone depletion in the stratosphere began to appear in the 1980s. Atmospheric concentrations of most ozone-depleting substances peaked, or their growth rate began to slow, as a result of the phasing out of these chemicals under the Montreal Protocol. Concentrations of ozone-depleting substances are expected to decline over the coming century, bringing a gradual recovery of the ozone layer.

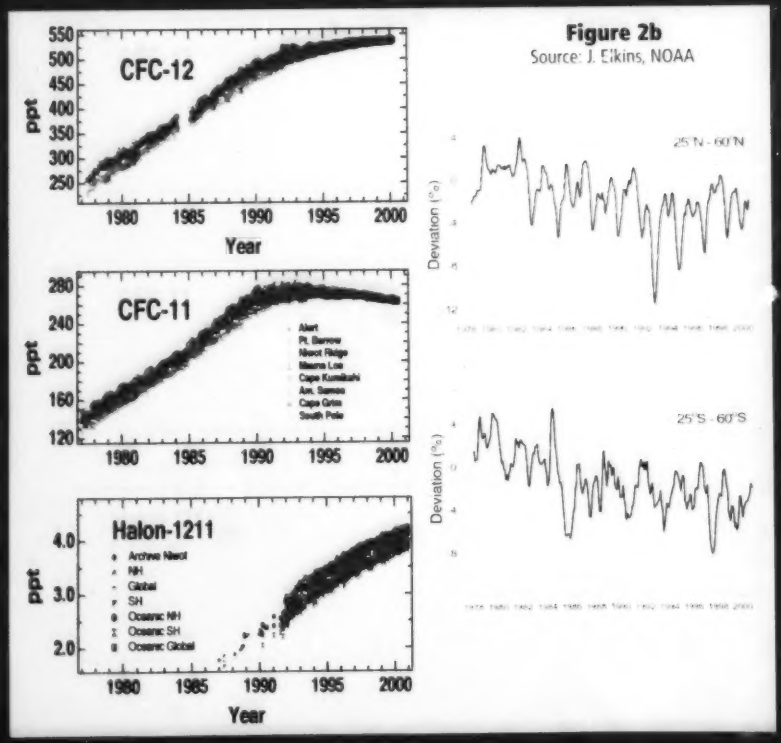


Figure 2b
Source: J. Elkins, NOAA

Introduction

Climate change and the depletion of the stratospheric ozone layer have been leading environmental issues for more than a quarter of a century. For much of that time, they have been treated as separate and distinct problems, with researchers setting up separate programs to investigate the underlying scientific questions and governments establishing separate international arrangements to coordinate control measures.

In many ways, of course, these issues are quite distinct. Climate change is concerned with how carbon dioxide, methane, and other greenhouse gases emitted by human activities are altering the climate system *(Figure 2a)*. Consequently, research into climate change has focused largely, though not exclusively, on trends and processes within the troposphere, the layer of turbulent air, some 8–16 km deep, that is closest to the earth's surface. Ozone depletion, on the other hand, is about how certain industrially produced chemicals containing chlorine or bromine are damaging the earth's protective ozone layer, thus increasing the intensity of ultraviolet radiation at the earth's surface *(Figure 2b)*. Research into ozone depletion has therefo[re] focused largely, though [not] exclusively, on trend[s] processes within [the] stratosphere, the layer of stratified, relatively stable air that houses the ozone layer and extends from the top of the troposphere to an altitude of about 50 km. Yet, as scientists have come to understand more about these issues and the complex physical and chemical processes that drive them, they have also become increasingly aware of a number of important connections between them.

Recognition of these connections parallels a growing awareness among scientists and policy makers that atmospheric issues cannot be dealt with in isolation from each other. The human activities that contribute to climate change and ozone depletion, or to any other air pollution problem for that matter, affect the same atmosphere. And because the atmosphere is a very complex entity, changes to one aspect of it can often initiate changes that affect other aspects of the atmospheric system. Consequently, human activities that [alter] the atmosphere, even in [some] subtle ways, can have important and surprising results. To take account of the many complicated interactions that occur in the atmosphere, scientists and policy makers are increasingly taking a more holistic approach to atmospheric issues.

The most obvious linkage between ozone depletion and climate change is the fact that ozone itself and some of the more important ozone-depleting substances such as chlorofluorocarbons (CFCs) and hydrochlorofluorocarbons (HCFCs) are also powerful greenhouse gases. But ozone depletion and climate change are linked in many other ways as well, particularly through their effects on physical and chemical processes in the atmosphere and on interactions between the atmosphere and other parts of the global ecosystem.

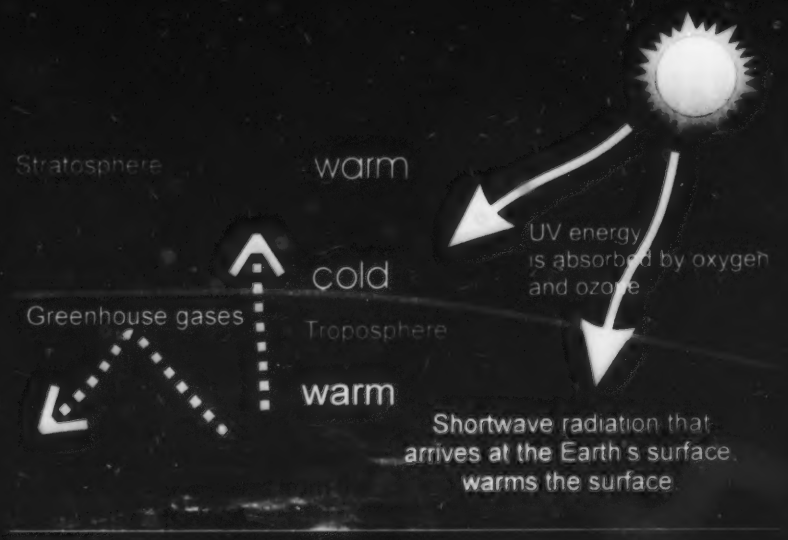
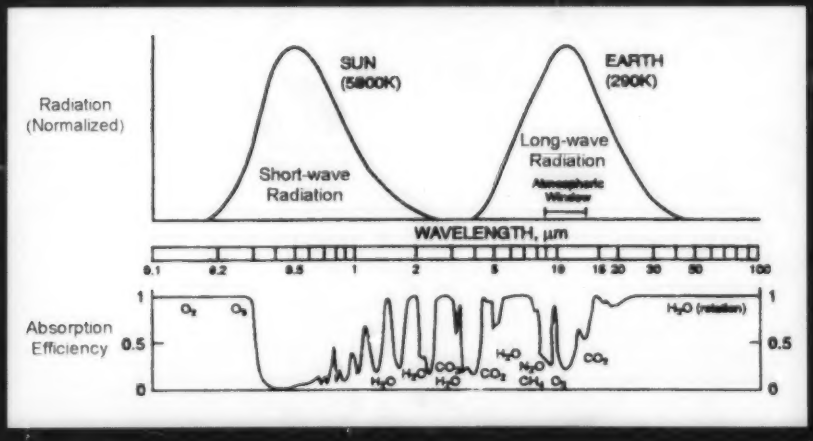


Figure 3

Figure 3. The contrasting temperature patterns in the troposphere and stratosphere are the result of differences in the way radiative energy is transferred to the atmosphere. The stratosphere is heated from the top down as intense ultraviolet radiation is absorbed by oxygen and ozone. The troposphere is heated from the bottom up as the earth's surface warmed by incoming sunlight, emits longwave infrared radiation, which is then absorbed and re-emitted by greenhouse gases in the air above. A small amount of heat is also transferred directly to the air by direct contact with the surface and by the evaporation and condensation of moisture. Because the troposphere generally becomes cooler with altitude, the warmer and lighter surface air rises easily. As a result, the air in the troposphere is often turbulent and well-mixed. The stratosphere, on the other hand, tends to be quite stable because the increase of temperature with altitude inhibits vertical mixing of the air.

Figure 4. The basis of the greenhouse effect can be seen if we compare the wavelengths at which different atmospheric gases absorb radiation with the wavelengths at which radiation enters and leaves the atmosphere. The sun, because it is very hot, emits shortwave radiation, and although the shortest of these wavelengths are absorbed by oxygen and ozone, most solar radiation is not absorbed by atmospheric gases. The earth, because it is much cooler, emits longwave, infrared radiation, but most wavelengths in this part of the spectrum are readily absorbed by water vapour, carbon dioxide, methane, nitrous oxide, ozone, and other greenhouse gases. The atmosphere thus provides a very wide window through which incoming sunlight can penetrate but only a very narrow window through which infrared radiation can depart.

Figure 4
Source: adapted from Jacob, 1999



The Atmosphere
and its Radiative Effects

Radiative processes have an enormous influence on the behaviour of the atmosphere because they govern the amount of energy entering and leaving the earth-atmosphere system and hence the amount of energy available to heat the air, evaporate moisture, and drive the movement of air masses. This energy initially enters the atmosphere as shortwave radiation from the sun, but it is transferred to the troposphere and stratosphere in very different ways, giving these two layers of the atmosphere very different structures and characteristics *(Figure 3)*.

The stratosphere is heated from the top down and is therefore warmer at the top than it is at the bottom. Consequently, the densest air in the stratosphere is at the bottom, there is little vertical mixing of the air, and the stratosphere is very stable. Heat is added to the stratosphere when strong ultraviolet-C (UV-C) radiation from the sun is absorbed by oxygen molecules and causes them to split. One of the results of this process is the production of ozone [illegible] formation [illegible] the [illegible] occurs [illegible] intercept[illegible] [illegible]

beneficial byproduct of these processes is that most of the ultraviolet radiation that is harmful to plant and animal life on earth is filtered out in the stratosphere and does not reach the earth's surface. Some additional heating of the stratosphere also occurs because ozone absorbs infrared radiation emitted by the earth's surface.

In the troposphere, in contrast, very little of the incoming solar radiation is absorbed directly by the atmosphere. Instead, the shortwave radiation warms the earth's surface, which then transfers heat energy to the atmosphere in a variety of ways – partly through direct contact between the surface and the air, partly through the evaporation and condensation of moisture, but mostly through the emission of longwave infrared radiation, which is absorbed by [illegible] other [illegible] nitrous [illegible] surface, these gases retain heat at the bottom of the atmosphere [illegible]

of this greenhouse effect, the earth's average temperature is some 33°C warmer than it would otherwise be and the planet is able to support life *(Figure 4)*.

Because it is heated in this way, air in the troposphere is generally warmest at the surface and becomes cooler with increasing altitude. Since warm air is less dense than cool air, the warm air rises and cooler air moves in at the surface to take its place. This simple convective flow is modified by the earth's rotation, by surface features, and by temperature differences between the equator and the poles. The end result is a rather turbulent layer of the atmosphere in which air circulates in complicated and variable patterns, moving energy and moisture from place to place.

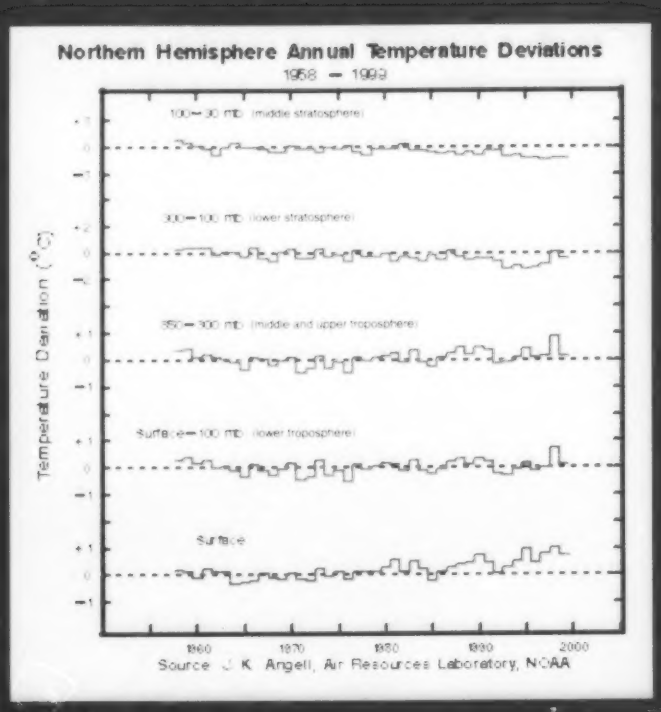


Figure 5

Figure 5. The stratosphere has cooled significantly since about 1980, mostly as a result of ozone loss but also because of the accumulation of greenhouse gases in the troposphere. Over the middle latitudes of the Northern Hemisphere, the cooling trend has been noticeably greater in the middle and upper stratosphere than in the lower stratosphere.

Figure 6. Polar stratospheric clouds such as these, photographed over Sweden during the winter of 2000, form in the lower stratosphere when temperatures drop below about –80°C. These clouds support chemical reactions that change stable bromine and chlorine compounds into more active, ozone-destroying substances. Cooling of the stratosphere as a result of climate change and ozone depletion increases the possibility that these clouds will form.

Figure 6

When ozone-depleting chemicals are released into the atmosphere, however, these radiative processes are modified in a variety of ways:

- Because the most effective ozone-destroying substances, such as CFCs and HCFCs are also strong greenhouse gases, the greenhouse effect is enhanced and the earth's surface and the lower troposphere become warmer.
- Warming by CFCs and HCFCs is partially offset, however, by the ozone losses that these chemicals cause in the lower stratosphere. Because ozone is a greenhouse gas, a loss of stratospheric ozone weakens the natural greenhouse effect and cools the stratosphere.
- Thinning of the ozone layer also means that less heat is available to the stratosphere from the absorption of UV-B radiation by ozone molecules. That also has a cooling effect on the stratosphere.
- With fewer ozone molecules available in the stratosphere to absorb UV-B radiation, more of that radiation reaches the ground. That contributes to additional warming of the earth's surface and the l[illegible]

An inc[illegible]

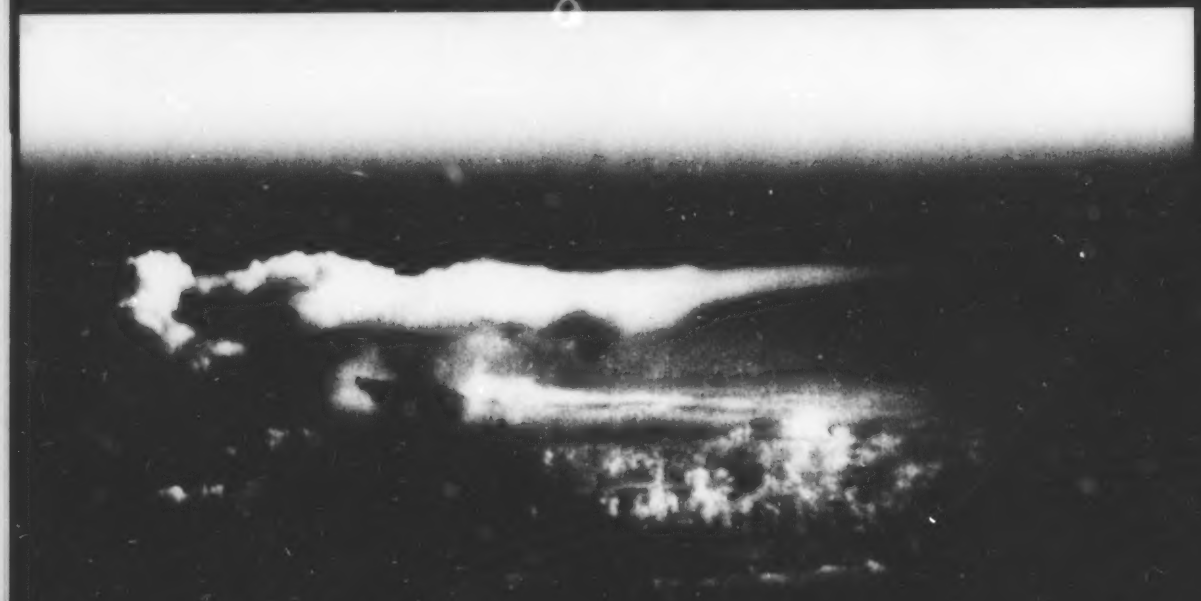
gas concentrations increase, the downward flow of longwave radiation increases and the upward flow diminishes, thus exerting a warming force on the troposphere and a cooling force on the stratosphere *(Figure 5)*. Although all greenhouse gases contribute to warming in the troposphere, the effect of individual greenhouse gases on the stratosphere can vary considerably, depending on whether they cause a greater reduction in upward emissions at the bottom of the stratosphere or at the top. Carbon dioxide has the greatest cooling effect on the stratosphere, while CFCs actually have a warming effect on it. Nevertheless, the net result of an increase in concentrations of all greenhouse gases is a cooler stratosphere.

Cooling of the stratosphere has important consequences for ozone depletion, because it contributes to the formation of polar stratospheric clouds (PSCs). These clouds *(Figure 6)*, which form only at extremely low temperatures in the lower stratosphere during the sunless polar winter, provide a medium for chemical [illegible]ctions that chang[illegible]

into much more active chemicals. It is these chemicals that cause rapid ozone destruction when sunlight returns to the polar regions in the spring. PSCs are a key factor in the severe ozone-depletion that occurs over polar regions in the spring.

The different heating and cooling forces that arise as a result of ozone layer depletion and increasing concentrations of greenhouse gases have been measured globally and studied using computer models. These studies indicate that the net result of all of these contending forces is a warming at the surface (due mainly to increased concentrations of greenhouse gases), a slight or negligible temperature increase in the middle to upper troposphere, and a cooling of the stratosphere (due mainly to the loss of ozone).

However, the effects of greenhouse gases and ozone depletion on the radiative balance are very complex and many uncertainties still remain. A number of research efforts are now under way in an attempt to resolve these uncertainties.



The Dynamics of the Atmosphere

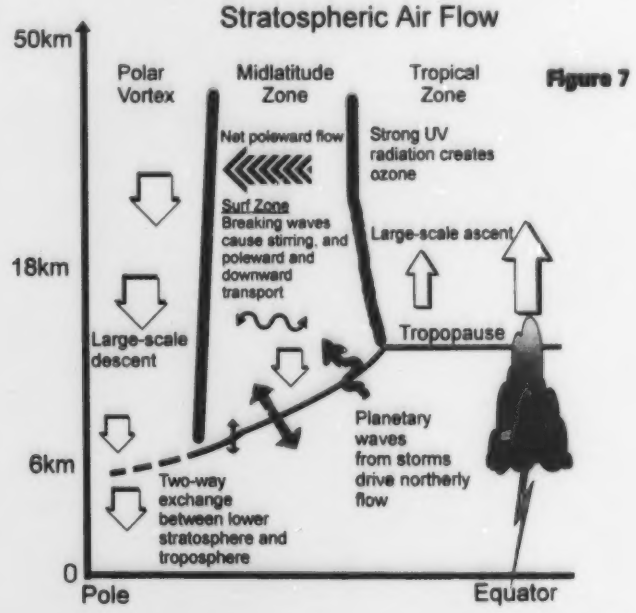
As greenhouse gases accumulate in the atmosphere, they alter temperature differences between different parts of the globe and different levels of the atmosphere and in this way change atmospheric circulation patterns. There is good reason to believe that these circulation changes may be enhancing ozone depletion over the poles by weakening some of the warming forces that act on the polar stratosphere.

One of these forces is known as dynamical heating, and it is associated with a slow general circulation pattern in the stratosphere in which air gradually rises in the tropics, moves towards the poles, and then slowly sinks over the poles *(Figure 7)*. The compression of the air as it descends over the poles causes it to become warmer. The energy that drives this circulation comes from atmospheric waves that penetrate upward from the troposphere. These waves are caused by large-scale atmospheric disturbances that are a result of differences in the way that land and water and different types of land surfaces affect the heating and movement of the air. They tend to be stronger in the Northern Hemisphere because of its greater land area, and thus cause the stratosphere to be warmer on average over the Arctic than it is over the Antarctic.

Atmospheric waves also affect the stability of a feature known as the polar vortex. This is a wind system that circles around each of the poles in winter and isolates the polar stratosphere, preventing the influx of warmer air and ozone from the lower latitudes. Because of this isolation, the area inside the vortex becomes an extremely favourable environment for the formation of PSCs and rapid ozone depletion. Before it finally dissipates in the spring, however, the vortex may occasionally be broken down by the action of strong atmospheric waves, thus allowing a temporary incursion of warmer air that makes conditions less favourable for the rapid destruction of ozone. Because atmospheric wave action is stronger in the Northern Hemisphere, the Arctic vortex tends to be less stable than the Antarctic vortex. Consequently, massive ozone holes, such as those that form regularly over the Antarctic in spring, have not yet occurred in the Arctic.

There is evidence from climate model studies, however, that the warming of the atmosphere near the earth's surface and the

Figure 7



circulation changes resulting from it may be weakening these planetary wave motions and thus their warming effect on the polar stratosphere. If so, this would have the effect of enhancing ozone depletion over both poles, but especially over the Arctic. Such a development would slow the recovery of the ozone layer that should occur over the coming decades as concentrations of ozone-depleting compounds in the stratosphere decline.

Research is also revealing mechanisms through which changes in the composition of the stratosphere can affect the movement of air in the troposphere. Meteorologists have long known that atmospheric pressure patterns at the earth's surface vary with the solar sunspot cycle, but they have had trouble explaining the connection, since the sun's total energy output varies by only about 0.1% across the entire cycle. Recent studies have shown, however, that the variation in solar energy is much greater in the UV-C portion of the spectrum, where the sun's output can vary by as much as 10% during the cycle. This is enough to have a noticeable effect on ozone amounts in the stratosphere, which have been shown to be about 1.5% greater at the solar maximum (when the number of sunspots is greatest) than at the solar minimum (when the number of sunspots is least). These changes in ozone amounts cause corresponding changes in the temperature of the stratosphere, which in turn result in changes in air pressure and wind flow.

Recent computer simulations at NASA's Goddard Institute for Space Studies have shown that changes in stratospheric airflow also affect the flow of energy downward into the troposphere, where it can have an impact on pressure and circulation patterns. Such changes may affect the position of the jet stream, which controls the path of weather systems in the troposphere. A small change in the path of the jet stream can cause very noticeable changes in regional climates. Initial studies with models, for example, suggest that increases in stratospheric ozone could have the effect of directing more storms into Canada. Further study is needed, however, to determine how long-term depletion of the ozone layer is affecting surface weather patterns.

Smog over the lower Fraser Valley

The Chemistry of the Atmosphere

Ozone depletion is largely a matter of atmospheric chemistry, but chemical processes play an important part in climate change as well, particularly in the generation and breakdown of some greenhouse gases. The chemistry of ozone depletion and that associated with climate change interact significantly in at least two ways.

One way is through photochemistry – chemical processes that are driven by energy from the sun. Many reactions in the atmosphere are of this kind, and the amount of ozone in the stratosphere affects the rate at which these reactions occur, because it determines how much of the sun's high-energy UV-B radiation reaches the atmosphere near the ground. This has important consequences for climate change, because ground-level or tropospheric ozone, a significant greenhouse gas and a major constituent of smog, is photochemically produced *(Figure 8)*. As the ozone layer thins and more ultraviolet radiation reaches the earth's surface, the photochemical reactions that produce ground-level ozone can proceed more vigorously. Average ozone amounts over Canada are now about 6% below pre-1980 values. Scientists estimate that this decrease has resulted in a corresponding increase of about 7% in the amount of UV-B radiation reaching the earth's surface. Recent computer model research indicates that an increase in UV radiation will result in an increase in ground level ozone in polluted urban areas where there are high concentrations of nitrogen oxides, carbon monoxide, and hydrocarbons.

The other linkage involves a short-lived, highly reactive molecule known as the hydroxyl radical (OH), which is produced by the photochemical breakdown of ozone in the presence of water vapour. OH is an atmospheric scavenger that reacts with many pollutants and removes them from the atmosphere. These include the greenhouse gas methane as well as ozone-depleting methyl chloroform and gases such as hydrochlorofluorocarbons (HCFCs) and hydrofluorocarbons (HFCs) that are both ozone depleters and greenhouse gases. In addition, OH reacts with a host of other pollutants, including carbon monoxide, volatile organic compounds, and various oxides of nitrogen. There is some concern that the demands on the hydroxyl radical in a heavily polluted atmosphere may lead to a decline in OH concentrations and thus a reduction in the efficiency with which methane and various ozone-depleting compounds are removed from the atmosphere. Slower removal of these compounds would intensify the process of climate change and slow the recovery of the ozone layer. Although global hydroxyl amounts cannot be estimated with a high degree of certainty, some recent evidence suggests that a significant decline in hydroxyl concentrations has taken place during the 1990s and that further declines can be expected in the coming decade.

Figure 8

Source: Ontario Ministry of the Environment (ozone) and Environment Canada (UV Index)

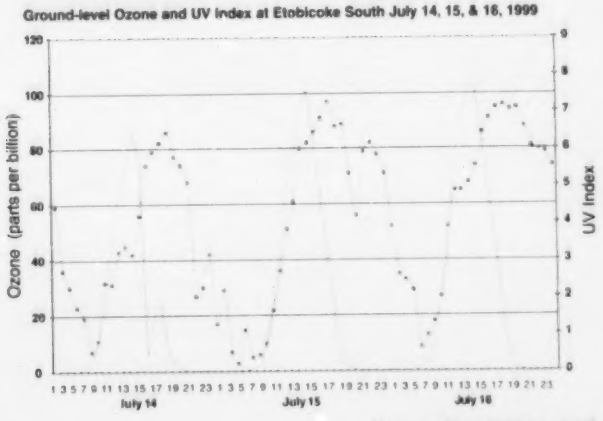


Figure 8.

Biogeochemical Linkages:
The Impact of Increased UV Radiation

Changes in climate and changes in the intensity of ultraviolet radiation can both have substantial impacts on the biological, geological, chemical, and physical processes that control the exchange of matter and energy between the major components of the environment – the atmosphere, the biosphere, the hydrosphere, and the lithosphere. Probably the most familiar of these exchanges is the carbon cycle, in which carbon is transferred continuously between the atmosphere, the oceans, living things, and the rocks and soils, changing from an almost purely elemental form, as in charcoal or anthracite, to a simple gas like carbon dioxide, or to one of numerous organic compounds as it moves from one environmental reservoir to another.

The carbon cycle is of central im[illegible] in the climate change [illegible] disruption [illegible] cycle, [illegible] through the burning of fossil fuels and the clearing of forests, is largely responsible for the modern increase in atmospheric concentrations of carbon dioxide, the most abundant anthropogenic greenhouse gas. One of the more important links in the carbon cycle from an atmospheric perspective is the so-called "marine biological pump." This is a process in which plankton, the microscopic plants and animals that live near the surface of the oceans and freshwater lakes, remove carbon from the air and then transfer it to the ocean bottoms and lakebeds when they die. Ozone depletion, particularly severe episodes such as the spring ozone holes in the Antarctic, present a potentially serious threat to this process, because plankton cannot take shelter from solar radiation. A serious decline in their numbers as a result of exposure to more intense ultraviolet radiation could therefore decrease the rate at which carbon dioxide is removed from th[illegible]mosphere.

Similarly, biological changes initiated by changes in climate might have some effect on ozone depletion. Methyl chloride and methyl bromide, for example, are two ozone-depleting compounds whose production and use are now being phased out under the Montreal Protocol. However, because natural sources of these gases are larger than the human industrial sources, anything affecting the ecosystems and natural processes that produce these gases could also have consequences for the ozone layer. Much has yet to be learned about these natural sources, but coastal marshes appear to be important contributors. Fungi, crops such as rapeseed, and soils rich in organic matter are also thought to be substantial sources. Warming of the atmosphere and oceans or changes in sea level could affect all of these sources by altering the ecosystems and climatic conditions that support the natural production of these gases. Climate change could also affect the rate at which these gases are removed from the atmosphere by the oceans. Studies of the natural production and removal of these gases are still in their early stages, however, and it is not yet possible to predict how climate change [illegible]ht affect the quantities of these gases in the atmosphere.

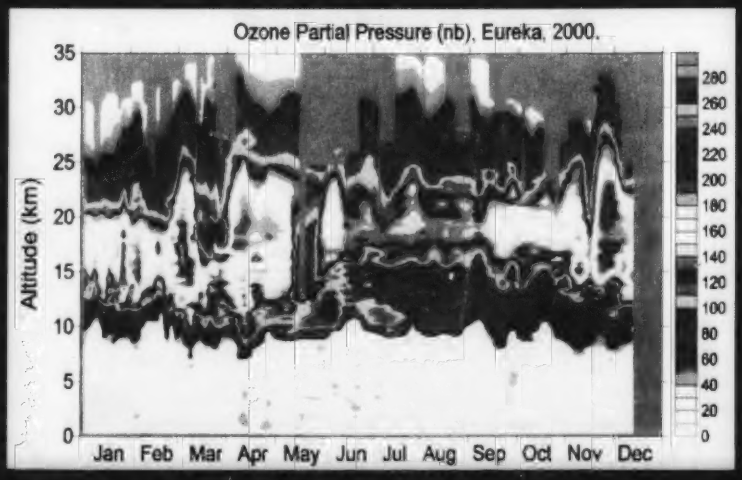


Figure 9

Figure 9. Ozonesonde data collected over Eureka in 2000 show the annual ozone cycle, with highest levels occurring in the winter and early spring, and lowest levels in summer. The plot also shows unusually low levels of ozone in late March and early April between about 15 and 20 km. This depleted area is believed to be the result of high levels of chlorine and bromine in a very cold Arctic stratosphere.

Figure 10. At Environment Canada's observatory at Alert on Ellesmere Island in the High Arctic, background concentrations of greenhouse gases, ozone-depleting substances, and aerosols are monitored daily.

Figure 10

Canadian Research and Monitoring

Through its Experimental Studies Division, Environment Canada's Air Quality Research Branch is involved in a number of activities that are contributing to a better understanding of ozone depletion and its interactions with climate change. Some of these activities are research projects designed to provide new knowledge about atmospheric constituents and processes. Others are long-term monitoring programs whose function is to provide a long and continuous record of atmospheric conditions that can be used as a reliable basis for identifying trends and changes in the atmosphere's composition and behaviour. These activities, which also assist in evaluating the effectiveness of controls under the Montreal Protocol and help to set strategies for the future, are carried out through the following key facilities and programs.

Ground-based ozone monitoring and ozonesondes

Canadian scientists have been using ground-based instruments to measure total ozone amounts since the 1950s. These measurements are now taken at 12 sites across Canada, using the Canadian-developed Brewer ozone spectrophotometer. Three of the instruments are in the High Arctic, at Resolute Bay, Eureka, and Alert. The Brewer network is a fundamental source of information about changes in the state of the stratosphere. At a more practical level, it also provides data for use in producing UV Index reports and forecasts.

These ground-based measurements are supplemented by data gathered by small balloon-borne sensors known as ozonesondes. Weighing about 3 kg, these instrument packages provide continuous measurements of ozone concentrations up to an altitude of about 20 km *(Figure 9)*.

Arctic observatories

In 1992 Environment Canada built the High Arctic stratospheric ozone observatory near the Eureka weather station on Ellesmere Island. The observatory is the main centre for atmospheric research in the Arctic and is also a primary component of the international Network for the Detection of Stratospheric Change, a series of high quality, ground-based stations that measure the physical and chemical state of the stratsphere. The Eureka observatory operates instruments that measure ozone, nitrogen dioxide, and other substances important to atmospheric chemistry. Canada also maintains an observatory at Alert on Ellesmere Island *(Figure 10)* that provides continuous monitoring of background concentrations of greenhouse gases, ozone-depleting substances, and aerosols (atmospheric particles). Analysis of this data provides information about the long-term variability of these substances and furthers understanding of the impact of human activities on the atmosphere.

The Alert observatory is an official baseline station for the World Meteorological Organization's Global Atmosphere Watch (GAW) program and is one of about 20 such stations around the world. The objective of the GAW program is to make available ongoing background concentration measurements of selected atmospheric constituents and related physical conditions for every major region of the globe. The Canadian Baseline Program began at Alert in 1975 with simple measurements of carbon dioxide. By 1998, the program had expanded to include measurements for other greenhouse gases, such as methane, ozone, and chlorofluorocarbons.

Radiation studies (Bratt's Lake Observatory)

The Bratt's Lake Observatory, located about 20 km south of Regina, is the Canadian link in the World Climate Research Programme's Baseline Solar Radiation Network. This is a network of approximately 40 stations, spread across all seven continents that take very accurate measurements of solar and infrared radiation *(Figure 11)*. Since shortwave radiation from the sun and the longwave infrared radiation emitted by the earth's surface and atmosphere provide the energy that drive the earth's climate system, this information can provide evidence of how changes in radiative energy flows are affecting regional and global climate change. The Bratt's Lake

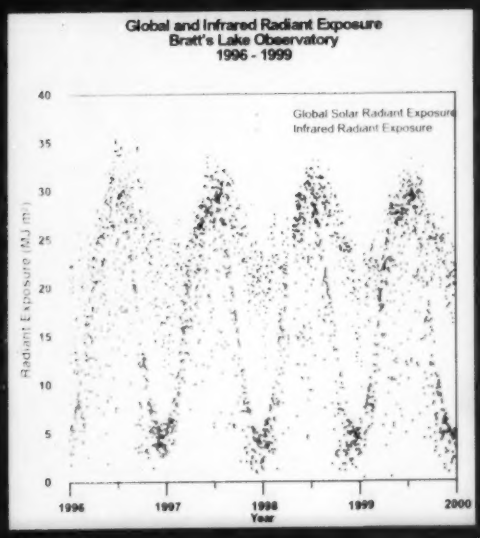


Figure 11
Source: B. Arthur, Environment Canada

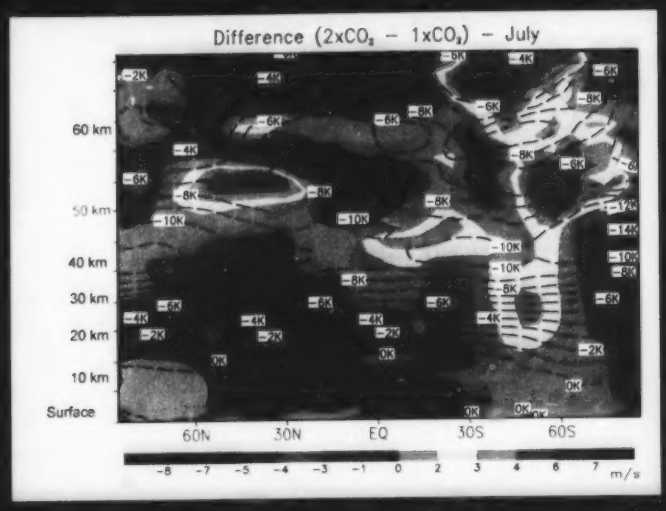


Figure 12
Source: de Grandpré 2001

Figure 11. Measurements of daily amounts of solar and infrared radiation reaching the earth's surface should allow the detection of trends over time. The four-year plot shown here indicates little change in either solar or infrared radiation from one summer to another. Over the four winters, however, solar radiation has declined and infrared radiation has increased. These changes may be the result of increased cloud cover during the winters. Many more years of data will be needed, however, before it can be determined whether this pattern is part of a longer-term trend or simply a result of the climate's natural short-term variability.

Figure 12. While increasing concentrations of greenhouse gases lead to warming at the earth's surface, they cause cooling in the stratosphere. The plot shown here shows the potential effects of a doubling of atmospheric carbon dioxide concentrations on summer temperatures and winds in the stratosphere, as estimated by the Canadian Middle Atmosphere Model. Temperature changes are indicated by the dashed lines in degrees Kelvin (1°K is the same as 1°C, but the Kelvin scale starts at absolute zero or –273°C). Wind speed changes are shown by the coloured areas. The model shows the greatest cooling occurring near the top of the stratosphere, with temperatures in the upper stratosphere over the Antarctic cooling by as much as 14°K.

Figure 13. The graph shows the average daily amount of ultraviolet-B radiation received at Toronto, Edmonton, and Churchill for each year since 1965. Values from the late 1980s on are derived from actual measurements. Earlier values are estimates derived from related meteorological information by a statistical model. UV-B amounts begin to increase noticeably at all locations in the early 1980s, shortly after the thinning of the ozone layer is believed to have started. The increase at Churchill, however, has been greater than at the other two locations. This is thought to be due to climatic factors, although it is as yet unclear whether these are related to long-term climate change.

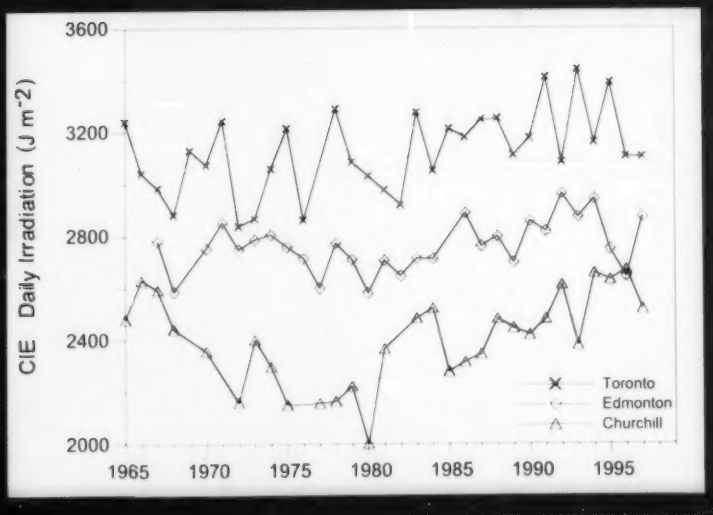


Figure 13
Source: V. Fioletov, Environment Canada

Observatory, which has been operational since the mid-1990s, provides researchers with a relatively non-polluted environment in an area where the climate is expected to change significantly as greenhouse gases increase.

Balloon-based ozone research

Over the past 20 years, Environment Canada has worked with the Canadian Space Agency and partners in the universities and industry to collect data about reactive nitrogen compounds, chlorine and bromine compounds, ozone, aerosols, and other substances that play a critical role in the chemistry of the upper troposphere and the stratosphere. This work is coordinated under the Middle Atmosphere Nitrogen Trend Assessment program or MANTRA. To collect the data, researchers use large polyethylene balloons, about 20 stories high, that carry instruments to altitudes of, typically, 30–40 km. The instruments scan the earth's horizon at various altitudes and record the spectra produced by scattered sunlight. At the end of the flight, the instrument payload is separated from the balloon and descends to earth by parachute, where it can be recovered. Analysis of the recorded data then provides information about the chemical composition of the atmosphere at different altitudes. Information from the MANTRA flights not only contributes to a better understanding of stratospheric processes but also helps governments determine the effectiveness of controls on ozone-depleting substances under the Montreal Protocol.

The Canadian Middle Atmosphere Model

Computer modelling is an important tool that helps researchers improve their understanding of atmospheric processes, study the impact of natural and human-induced changes in the atmosphere, and make long-term predictions about atmospheric change. The Canadian Middle Atmosphere Model (CMAM), developed jointly by scientists from Environment Canada and the universities, provides a sophisticated representation of important physical and chemical processes in the upper troposphere and the stratosphere. The model has recently been used to study how the middle atmosphere would change if the atmosphere contained twice as much carbon dioxide as it does now. Results of this study suggest that an increase in carbon dioxide will lead indirectly to a cooling of the middle atmosphere as more radiation is emitted to space from other areas of the atmosphere. These results are consistent with observations taken over the past few decades that show a cooling trend in some parts of the middle atmosphere. Although most of the observed cooling of the stratosphere is thought to be a result of ozone loss, part could also be the result of increased concentrations of carbon dioxide *(Figure 12)*. The results also show small but significant changes in the distribution of ozone throughout the middle atmosphere as a result of the increase in carbon dioxide.

UV Climatology and Research

Measurements of the strength of UV radiation at the earth's surface were not taken on a regular basis in Canada until the introduction of the Brewer spectrophotometer in the late 1980s. When Environment Canada researchers set out a decade later to estimate long-term trends in UV radiation, the length of the data record was still too short to yield reliable results. To overcome this problem, they developed statistical models that estimated the UV irradiance from a combination of earlier data on solar radiation, total ozone levels, dew point temperature, and snow cover. Using this method, they found that the strength of UV

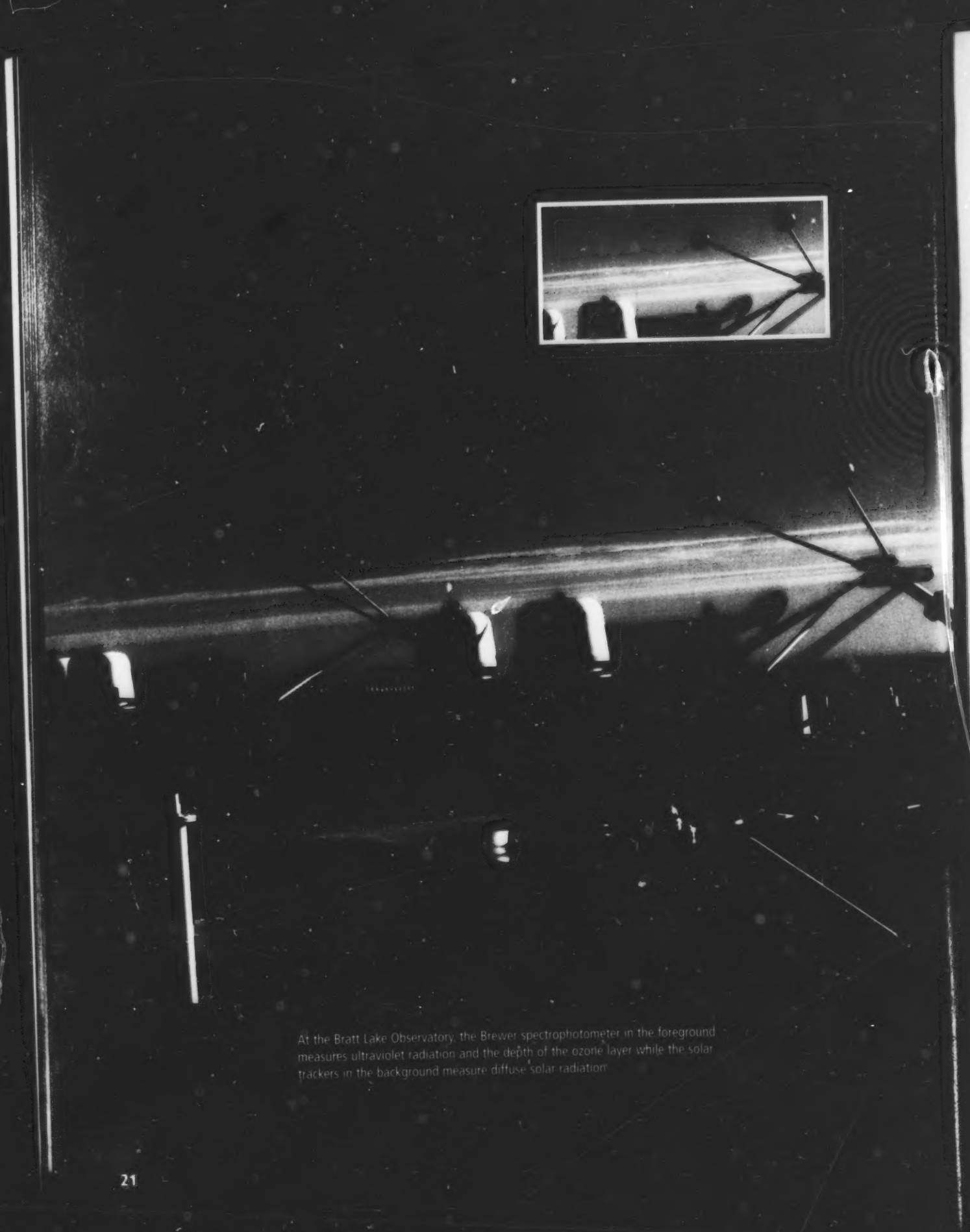
Implications for Policy

Thanks to the Montreal Protocol of 1987 and the various amendments made to it in subsequent years, concentrations of CFCs, halons, and other major ozone-depleting substances in the atmosphere are now decreasing. As these concentrations decline further over the rest of century, the effects of stratospheric ozone depletion on climate change can be expected to diminish gradually. Full compliance with the Protocol would see concentrations of ozone-depleting substances fall by the end of the century to the point where they would no longer be a significant threat to the ozone layer. However, it is unlikely that full compliance will be achieved; therefore, recovery of the ozone layer will almost certainly take longer. The effects of ozone depletion on climate change will also continue longer if CFCs are replaced by substitutes such as hydrofluorocarbons (HFCs), which are also potent greenhouse gases. The greenhouse effect of these gases, moreover, would be in addition to that of older ozone-depleting substances that remain in the atmosphere.

While atmospheric concentrations of ozone-depleting substances are declining, concentrations of important greenhouse gases, such as carbon dioxide and methane, that have no direct connection with ozone depletion, continue to increase. Higher concentrations of these gases may have the effect of prolonging the recovery of the ozone layer, mainly through their effects on stratospheric cooling and the formation of polar stratospheric clouds. Recent computer simulations support this notion and suggest that expected increases in greenhouse gas concentrations could cause severe polar ozone depletion to continue for about 10–20 years longer than it would if concentrations of greenhouse gases had remained at earlier levels. These studies are very preliminary, however, and further investigation [illegible] more refined models is needed.

From a policy perspective, [illegible] clear that actions to miti[illegible] global warming can hav[illegible] effects on ozone deple[illegible] vice versa. However, [illegible] taken to avoid solu[illegible] problem that ma[illegible] worse. Policy ma[illegible]tists are now [illegible] difficulty as the[illegible] term alternatives [illegible] and other o[illegible]stances who[illegible] phased out [illegible] Protocol. [illegible] HCFCs, [illegible] ozone-depl[illegible] CFCs b[illegible] gases, [illegible] need to [illegible] for both [illegible]

But further problems remain. What, in particular, should we do about HFCs and any other greenhouse gases now being promoted as alternatives to CFCs and HCFCs? Although concentrations of these gases in the atmosphere are as yet fairly low, they are expected to inc[illegible] over time if [illegible] these s[illegible]stan[illegible]ntrolled. Canada ha[illegible] the position that th[illegible]s should be re[illegible] ac[illegible]



At the Bratt Lake Observatory, the Brewer spectrophotometer in the foreground measures ultraviolet radiation and the depth of the ozone layer while the solar trackers in the background measure diffuse solar radiation.

The Research Agenda

On the research side, more needs to be known about how the troposphere and the stratosphere interact. The following are some of the more important questions now being pursued.

- *What are the major coupling mechanisms between the troposphere and the stratosphere and how do they affect climate?* We know, for example, that the vertical temperature structure of the troposphere is sensitive to changes in the vertical temperature structure of the stratosphere. We also know that waves propagating upwards from the troposphere reach into the stratosphere and affect temperatures and circulation there. Similarly, waves generated in the stratosphere can penetrate downwards and affect weather in the troposphere. Further study of such mechanisms will improve our understanding of how conditions in the stratosphere affect climate in the troposphere and vice versa.
- *How do changes in the vertical temperature structure of the troposphere and stratosphere affect climate?* During the past three decades, researchers have measured a cooling of the stratosphere and a warming of the lower troposphere. These changes could affect the height of the tropopause, the boundary between the troposphere and the stratosphere. Such a change could, in turn, affect the height of convection currents within the troposphere, such as those associated with thunderstorms, and could possibly affect the intensity of those storms. It might also alter the positions of the planet's jet streams and thus the movement of weather systems.
- *How will changes in tropospheric aerosol concentrations affect solar radiation at the earth's surface?* Aerosols are tiny atmospheric particles and droplets. They come from both natural and human-related sources. For most of the twentieth century, industrial activities substantially increased the atmospheric loading of aerosols, especially sulphates. Because sulphates contribute to acid rain as well as human health problems, emissions of them have been reduced substantially in Europe and North America since the 1970s. Although emissions have increased with industrialization in other parts of the world, it is expected they too will eventually fall for the same reasons. Sulphate aerosols reflect sol radiation back to space, thu exerting a cooling force at earth's surface and reduc the amount of ultraviolet radiation that penetrates atmosphere. As the amo sulphate aerosol in the sphere declines, howe surface warming may as more sunlight reac earth's surface. In addition, with more sunlight more ultraviolet radiation will also reach the earth's surface. Since ultraviolet radiation contributes to the formation of ground-level ozone, which is both a greenhouse gas and a major constituent of smog, reduction in sulphate concentrations could further intensify greenhouse warming as well as lead to more ozone pollution in many areas.
- *How will stratospheric cooling affect the formation of ozone holes?* Since their discovery in 1985, Antarctic ozone holes have become increasingly larger. The hole that formed in September 2000 was, at the time of writing, the largest yet recorded, covering an area of 28.3 million square kilom a little bit bigger tha North America an slightly smaller Africa (*Figu 14*). The ex

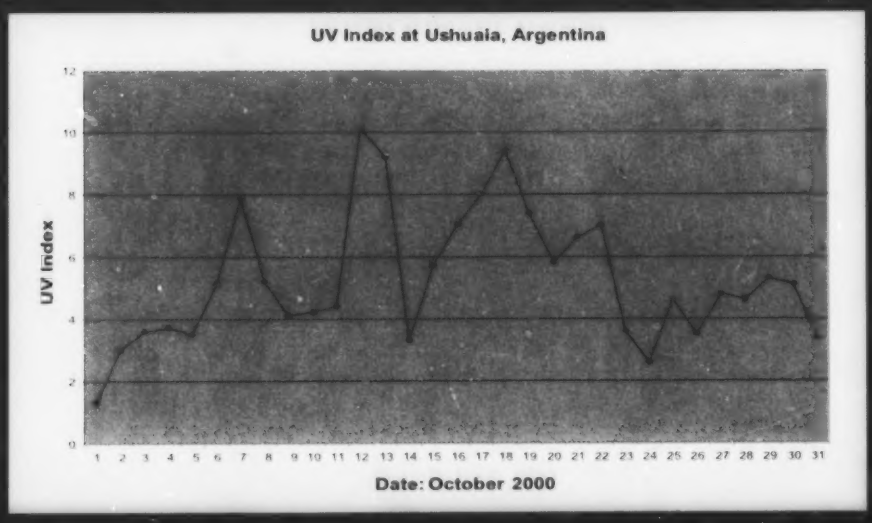


Figure 14
Source: NASA, from Servicio Meteorológico Nacional, Argentina (bottom)

Figure 14. The Antarctic ozone hole reached its largest extent yet in October 2000, and for the first time extended over sizeable settled areas in southern South America. UV Index values in Ushuaia, Argentina, were close to or greater than 8 on five different days and reached 10.1 on October 12. UV Index values for October in Ushuaia are normally around 4. Values greater than 10 are usually found only in tropical areas.[3]

southern tip of South America, subjecting Ushuaia, Argentina and the city of Punta Arenas in Chile, with a population of over 100,000 people, to very high ultraviolet radiation levels for that time of year. Since the early 1990s, severe ozone depletion has also been detected in some years in the Arctic stratosphere. In the spring of 2000, for example, ozone levels in the Arctic were depleted by almost 60% at an altitude of 18 km. Ozone depletion over the poles should decrease as the quantity of ozone-depleting substances in the atmosphere diminishes, but researchers need to know more about how changes in greenhouse gas and stratospheric ozone concentrations will affect temperatures in the polar stratosphere before they can confidently predict future trends in ozone hole formation.

- *How will changes in the amount of water vapour in the atmosphere affect climate change and ozone depletion?* Water vapour is the most abundant greenhouse gas in the atmosphere. In the stratosphere, water vapour in polar [illegible] clouds also acts as [illegible] ozone [illegible]

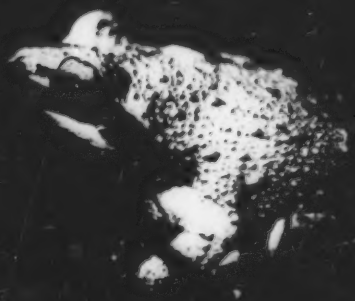
vapour in the atmosphere and that could have important consequences for both climate and ozone depletion. Scientists therefore need to determine whether the amount of water vapour in the atmosphere is actually increasing and, if so, how it is distributed in different parts of the atmosphere.

- *How will decreases in the atmospheric loading of chlorine and bromine affect climate change and ozone depletion?* As the amount of chlorine and bromine in the stratosphere decreases, ozone concentrations in the stratosphere should gradually increase towards natural levels. At the same time, however, atmospheric temperatures will be affected as the cooling effect of ozone loss and the warming effect of ozone-depleting greenhouse gases diminish. Data from monitoring systems that track ozone concentrations and other important atmospheric characteristics will help to verify that expected changes are taking place and expand our understanding of other changes that may be occurring.

Many of the research initiatives that are probing these and other related questions are taking place [illegible] the World Climate [illegible]'s SPARC project, [illegible]. The acronym [illegible] Processes and their Role in Climate, and the project embraces a number of studies designed to improve scientific understanding of the physical, chemical, and radiative connections between the troposphere and the stratosphere and their effects on climate. SPARC's current research agenda includes such areas as stratospheric indicators of climate change, the physics and chemistry of ozone depletion, the influence of ozone changes on climate, energy and gas exchanges between the troposphere and the stratosphere, and atmospheric waves.

Another important area of activity, and one in which SPARC is heavily involved, focuses on improving the way in which computer models of the atmosphere represent important linkages between ozone depletion and climate change. These improvements include better representation of the stratosphere in the general circulation models used to study climate change and better representation of atmospheric waves. Inclusion of these refinements will give us not only greater insight into how ozone depletion and climate change interact but will also provide a better understanding of how these linkages, in common with all the other factors affecting atmospheric change, will influence the future state of both the ozone layer and the surface climate.

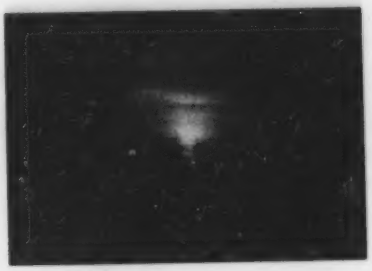
An integrated approach to atmospheric issues is also necessary because ecosystems and human health are affected not by just one of these issues but by all of them. The puzzling decline of amphibian populations, for example, may be a result of multiple stresses related to acid rain, persistent organic pollutants, and a number of other pollution issues. Increased UV levels (caused by ozone depletion) and changes in shallow water levels (caused by climate change) may also be contributing to the decline, as they make amphibian eggs more susceptible to water mould, which kills the embryos.

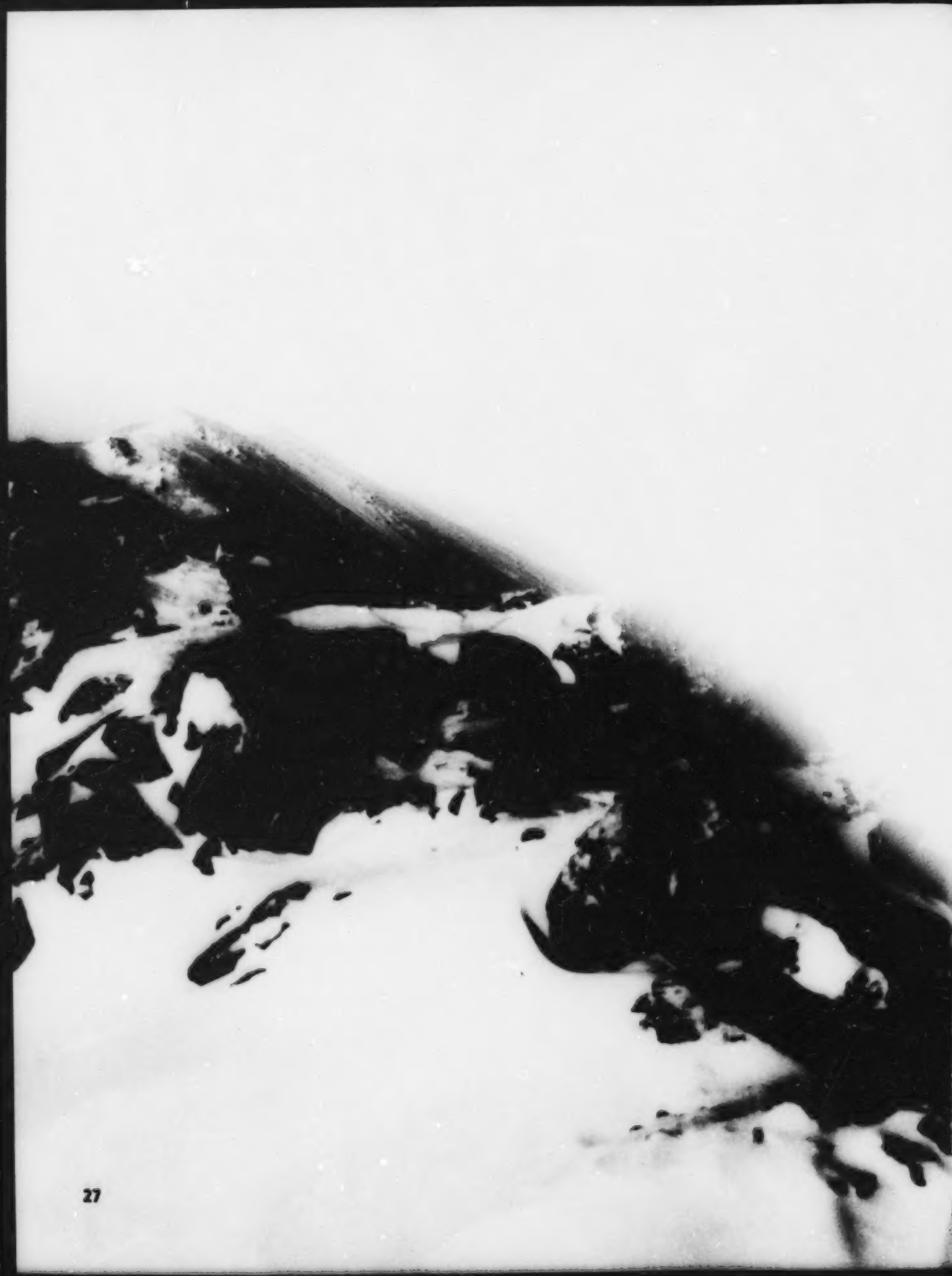


Making Connections

Increasingly both science and policy are being driven by the recognition that the atmosphere cannot be seen as a collection of separate compartments in which different things happen in isolation. Instead, researchers and policy makers are adopting a more comprehensive view of the atmosphere, seeing it as a single dynamic whole whose state at any given time depends on a maze of interactions not only between its different parts and processes but also with those of other parts of the ecosphere.

To take proper account of these interactions, atmospheric scientists are increasingly thinking outside the confines of their particular specialties and collaborating more closely with experts in other areas. The evolution of integrated approaches to ozone depletion and climate change – and to other atmospheric issues as well – is now enhancing our ability to understand and moderate the enormous changes that human activities have imposed on the earth's atmosphere over the past two centuries. Not only will these approaches help us deal more effectively with today's problems, but they will also give us a much better chance of anticipating and controlling any further human threats to the atmosphere that might occur in the future.





Bibliography

Angell, J.K. 2000. Global, hemispheric, and zonal temperature deviations derived from radiosonde records. In *Trends Online: A Compendium of Data on Global Change*. Oak Ridge, Tennessee: Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy.

Bernard, S.M., J. Samet, A. Grambsch, K. Ebi, and I. Romieu. 2001. The potential impacts of climate variability and change on air pollution-related health effects in the United States. *Environmental Health Perspectives*, **109**, 199-209.

Butler, J.H. 2000. Better budgets for methyl halides. *Nature*, **403**, 260-261.

Fioletov, V.E., B. McArthur, J. Kerr, and D. Wardle. 2000. Estimation of long-term changes in ultraviolet radiation over Canada. *Journal of Geophysical Research*, in press.

Harvey, D. 2000. *Global Warming: The Hard Science*. Toronto: Prentice Hall.

IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change). 2001. *Climate Change 2001, The Scientific Basis, Summary for Policymakers and Technical Summary of the IPCC WGI Third Assessment Report*. Geneva: Intergovernmental Panel on Climate Change.

Jacob, Daniel J. 1999. *Introduction to Atmospheric Chemistry*. Princeton: Princeton: Princeton University Press.

Labitzke, K and B. Naujokat. 2000. The lower arctic stratosphere in winter since 1952. *SPARC Newsletter*, No. 15, 11-14.

McArthur, L.J.B., V.E. Fioletov, J.B. Kerr, and D.I. Wardle. 1999. Derivation of UV-A irradiance from pyranometer measurements, *Journal of Geophysical Research*, 104, 30139-30151.

Rhew, R.C., B. Miller, and R.F. Weiss. 2000. Natural methyl bromide and methyl chloride emissions from coastal salt marshes. *Nature*, **403**, 292-295.

Rind, D., D. Shindell, P. Lonergan, N.K. Balachandran. 1998. Climate change and the middle atmosphere. Part III: The doubled CO_2 climate revisited. *Journal of Climate*, **2**, 876-893.

Rind, D., R. Suozzo, N.K. Balachandran, and M.J. Prather. 1990. Climate change and the middle atmosphere. Part I: The doubled CO_2 Climate. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **47**, 475-494.

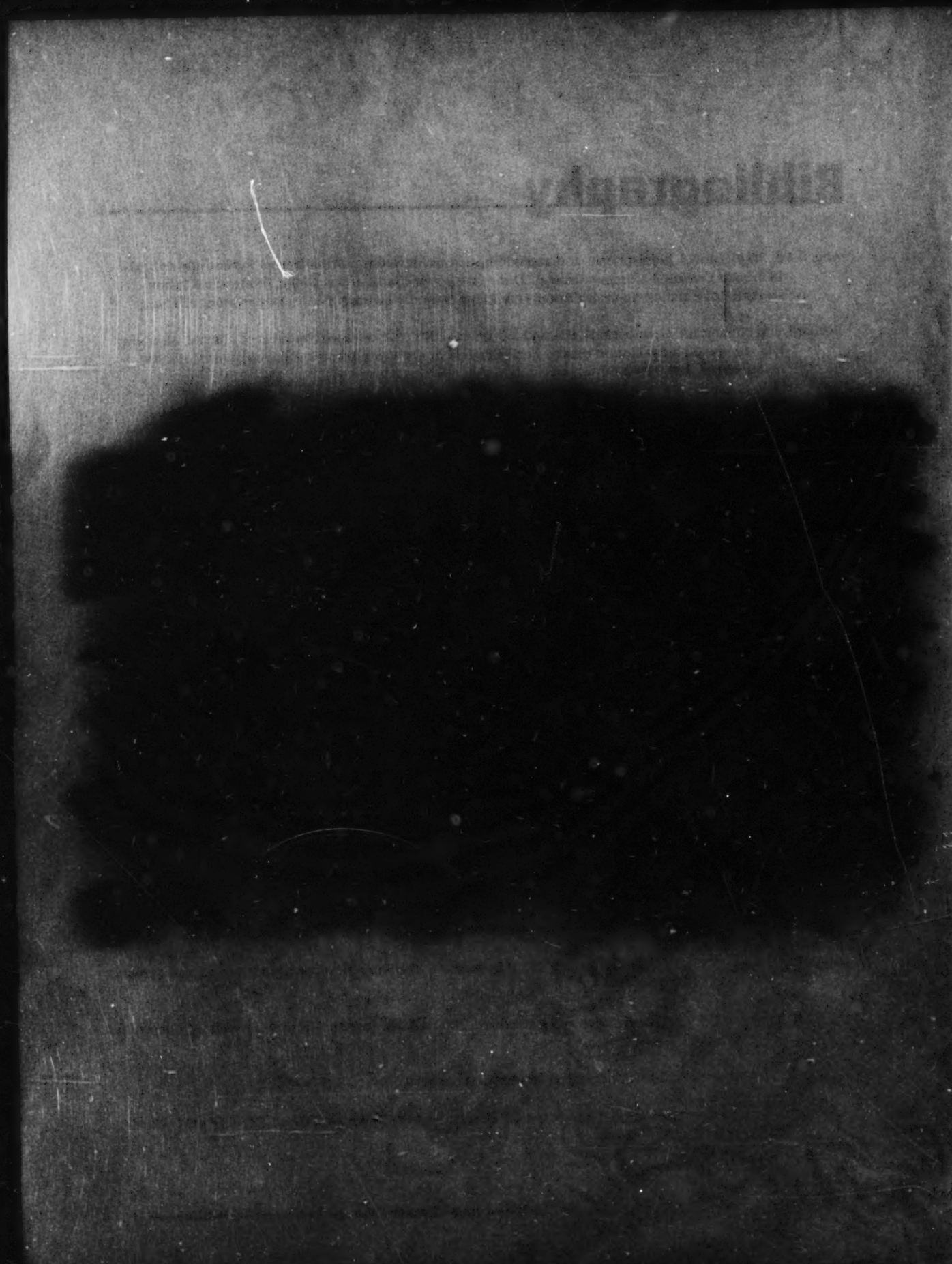
Shepherd, T.G. 2000. On the role of the stratosphere in the climate system. *SPARC Newsletter*, No 14, 7-10.

Shindell, D., R. Rind, N. Balachandran, J. Lean, and P. Lonergan 1999. Solar cycle variability, ozone, and climate. *Science*, **284**, 305-308.

Staehelin, J., N.R.P. Harris, C. Appenzeller, and J. Eberhard. 2001. Ozone trends: A review. *Review of Geophysics*, **39 (2)**, 231-290.

Wey[illegible] and [illegible] Zwiers. 2000. Uncertainty in climate change. *Nature*, 407, 571-572.

[illegible] Organization, 1999. *Scientific Assessment of Ozone Depletion: 1998*. Geneva: World [illegible] Organization.



Environnement Canada Environment Canada

Appauvrissement de l'ozone et changement climatique :

Canada

Appauvrissement de l'ozone et changement climatique :

des problèmes liés

Angus Fergusson
Service météorologique du Canada

Publication autorisée par le ministre de l'Environnement
Copyright © Travaux publics et Services gouvernementaux Canada, 2001

N° de catalogue EN56-168/2001F
ISBN : 0-662-30692-9

Also available in English

Auteur : Angus Fergusson *(Environnement Canada)*

Éditeurs : David Francis *(Lanark House Communications)*
David Wardle / Jim Kerr *(Environnement Canada)*

Contributeurs : Bruce McArthur *(Environnement Canada)* : Observatoire de Bratt's Lake
David Tarasick *(Environnement Canada)* : Modèle canadien de l'atmosphère moyenne
Tom McElroy *(Environnement Canada)* : Projet MANTRA

Remerciements spéciaux à : Vitali Fioletov *(Environnement Canada)*
Hans Fast *(Environnement Canada)*

Illustrations : Angus Fergusson *(Environnement Canada)*
John Bird *(Environnement Canada)*
Brent Colpitts
Ray Jackson

Conception : BTT Communications

On peut se procurer gratuitement des exemplaires supplémentaires auprès de :

Angus Fergusson
Direction de l'évaluation de la science et de l'intégration des politiques
Service météorologique du Canada
4905, rue Dufferin
Downsview (Ontario)
M3H 5T4
Courriel : Angus.Fergusson@ec.gc.ca

Table des matières

Résumé	2
Introduction	4
L'atmosphère et ses effets radiatifs	6
La dynamique de l'atmosphère	10
La chimie de l'atmosphère	12
Les liens biogéochimiques : impact de l'augmentation du rayonnement UV	14
La recherche et la surveillance au Canada	16
Les implications pour les politiques	20
Les recherches nécessaires	22
Les connexions	26
Bibliographie	28

Figure 1. Comparee a la planete, l'atmosphere de la Terre, vue de l'espace, semble remarquablement mince, comme la peau sur une pomme. Sur cette photographie, on voit bien les deux plus basses couches de l'atmosphère, la troposphere et la stratosphère. C'est dans la strato sphere qu'est situee la couche d'ozone qui protege les organismes vivants de l'intense rayonnement ultraviolet. La troposphère, quant a elle, est la couché ou se manifeste la majeure partie de l'activite meteorologique. Le sommet du nuage d'orage s'est aplati a la tropopause, qui est la limite entre les deux couches. Les interactions entre la troposphère et la stratosphere constituent d'importantes connexions entre l'appauvrissement de l'ozone et le changement climatique.

Figure 1
Source : NASA

Résumé

L'appauvrissement de l'ozone et le changement climatique ont généralement été considérés comme des problèmes environnementaux ayant peu en commun, hormis leur portée planétaire et le rôle principal qu'y jouaient les CFC et autres halocarbures. Cependant, à mesure que les connaissances évoluaient, on a pris conscience que des liens très importants les unissaient. Et ces liens auront une influence sur l'évolution future de l'atmosphère et de ces problèmes *(figure 1)*.

Certains des plus importants de ces liens tiennent à la façon dont les gaz à effet de serre et les substances qui appauvrissent la couche d'ozone modifient les processus radiatifs dans l'atmosphère, provoquant ainsi une augmentation du réchauffement planétaire et de l'appauvrissement de l'ozone stratosphérique. Ces changements induisent un réchauffement de la troposphère (région de l'atmosphère qui va du sol jusqu'à 8 à 16 km d'altitude) et un refroidissement de la stratosphère (la couche qui va de la troposphère jusqu'à 50 km et où se situe la couche d'ozone). Le refroidissement stratosphérique favorise la formation de [illegible] stratosphériques polaires (PSC), cause principale du développement des trous d'ozone polaires.

L'accroissement de l'effet de serre peut également occasionner des changements dans la circulation de la troposphère qui, à leur tour, modifient la circulation dans la stratosphère. Les scientifiques pensent que ces changements augmentent les forces de refroidissement qui agissent sur la stratosphère au-dessus des pôles, d'où la formation des trous d'ozone. De plus, on a des indications que les changements de la circulation stratosphérique peuvent modifier les régimes météorologiques de la troposphère. D'autres liens entre le changement climatique et l'appauvrissement de l'ozone sont attribués à l'effet de l'augmentation des niveaux du rayonnement ultraviolet sur les réactions chimiques induites par le rayonnement solaire dans l'atmosphère ainsi qu'au changement dans les processus biologiques qui influent sur sa composition.

Il en résulte une intensification du changement climatique et de l'appauvrissement de l'ozone ainsi qu'un ralentissement possible du rétablissement de la couche d'ozone en réponse à la diminution du niveau des CFC et autres substances réglementées par le Protocole de Montréal. Afin de mieux comprendre ces relations, les chercheurs se concentrent sur la manière dont la troposphère et la stratosphère interagissent. Les scientifiques d'Environnement Canada participent à cette recherche de diverses façons. Ils surveillent, entre autres, le niveau du rayonnement solaire et les concentrations d'ozone, et collaborent aux recherches stratosphériques par ballon et à la modélisation atmosphérique.

Le réchauffement dû à l'effet de serre et l'amincissement de la couche d'ozone stratosphérique sont le résultat des activités humaines qui ont changé la composition de l'atmosphère de manière subtile, mais néanmoins profonde, depuis le début de la révolution industrielle, il y a plus de deux cents ans. En adoptant une approche intégrée à l'appauvrissement de l'ozone et au changement climatique, les gouvernements et les scientifiques auront de meilleures chances de comprendre et de limiter les énormes changements que les act[illegible] atmosphère.

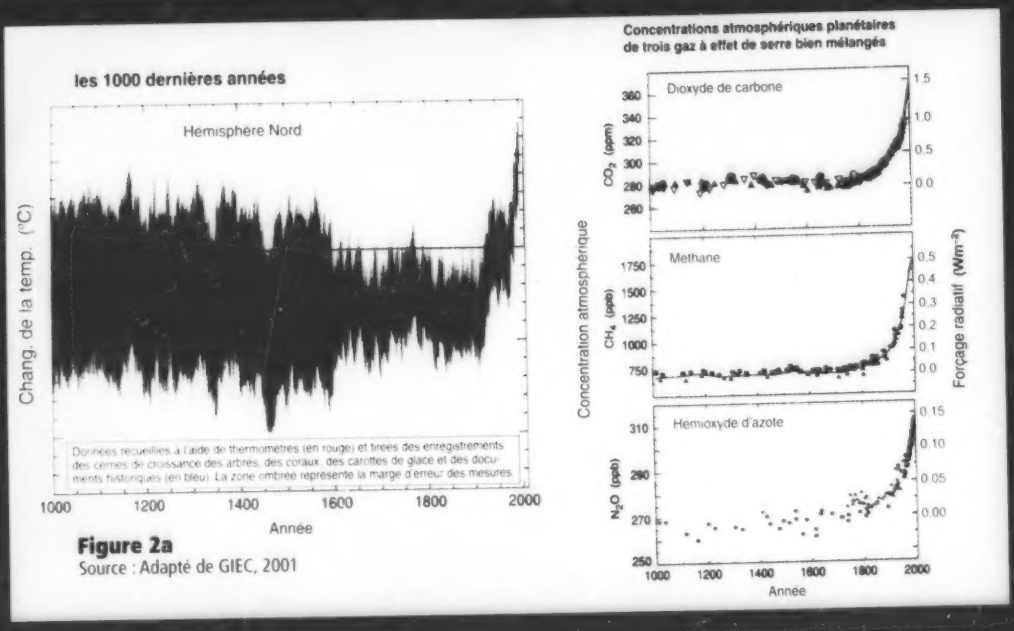


Figure 2a
Source : Adapté de GIEC, 2001

Figure 2a. Les gaz à effet de serre, comme le dioxyde de carbone, le méthane et l'hemioxyde d'azote, influent sur le climat en maintenant la chaleur à proximité de la surface de la Terre. Les concentrations de ces gaz ont commencé à monter au XIX^e siècle et ont augmenté de façon exponentielle au XX^e, parallelement à l'expansion des économies industrialisées et à la croissance démographique. Au cours du dernier siècle, la température planétaire moyenne s'est élevée d'environ 0,6 °C, et l'on prévoit des hausses significativement plus élevées au XXI^e siècle. Le réchauffement de l'atmosphère devrait aussi entraîner des modifications d'autres éléments du climat, dont des changements des précipitations et de l'évaporation, de la circulation et des phénomènes météorologiques extrêmes.

Figure 2b. L'appauvrissement de la couche d'ozone stratosphérique a été causé en grande partie par des composés chlorés et bromés de longue durée de vie, comme les CFC et les halons, qui ont fini par atteindre la stratosphère. L'utilisation de ces composés a beaucoup augmenté dans les années 1960 et 1970. Les indications de l'appauvrissement de l'ozone dans la stratosphère ont commencé à se manifester dans les années 1980. Les concentrations atmosphériques de la plupart des substances destructrices de l'ozone ont culminé, ou leur augmentation a commencé à ralentir, grâce à leur élimination aux termes du Protocole de Montréal. Les concentrations de ces substances devraient décliner au cours du prochain siècle, ce qui permettra un rétablissement graduel de la couche d'ozone.

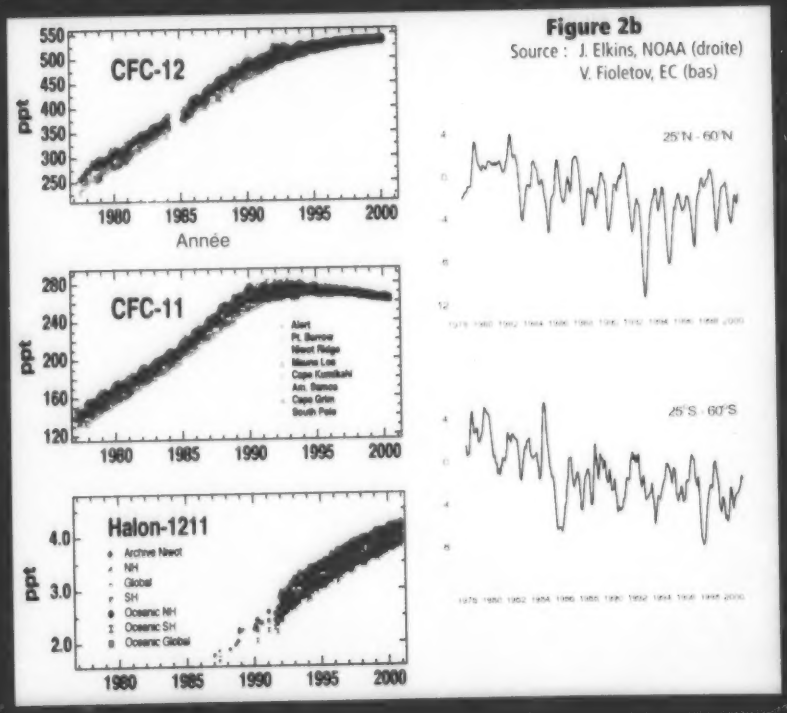


Figure 2b
Source : J. Elkins, NOAA (droite)
V. Fioletov, EC (bas)

Introduction

Depuis plus d'un quart de siècle, le changement climatique et l'appauvrissement de la couche d'ozone stratosphérique ont été des problèmes environnementaux de premier plan. La plupart du temps, ils ont pourtant été analysés séparément. Ainsi, les chercheurs ont établi des programmes séparés afin d'étudier les questions scientifiques sous-jacentes, tandis que les gouvernements ont mis en place des accords internationaux séparés afin de coordonner les mesures de limitation.

Il est certain que ces problèmes sont distincts à bien des égards. D'un côté, le changement climatique est dû au rejet, par les activités humaines, de dioxyde de carbone, de méthane et d'autres gaz à effet de serre *(figure 2a)*. La recherche sur le sujet s'est donc concentrée largement (mais pas exclusivement) sur les tendances et les processus à l'intérieur de la troposphère, couche d'air turbulent d'une hauteur de 8 à 16 km et qui est la plus proche du sol. D'un autre côté, l'appauvrissement de la couche d'ozone qui protège la Terre est le résultat de l'utilisation de certains produits industriels chlorés et bromés qui accroissent l'intensité du rayonnement ultraviolet à la surface de la planète *(figure 2b)*. La recherche sur ce sujet s'est donc concentrée largement (mais pas exclusivement) sur les tendances et les processus à l'intérieur de la stratosphère, couche d'air stratifié relativement stable où se situe la couche d'ozone et qui s'étend du haut de la troposphère jusqu'à une altitude de 50 km. Cependant, à mesure que les scientifiques ont mieux compris ces problèmes et les processus physiques et chimiques qui les régissent, ils ont réalisé qu'ils sont liés par un grand nombre de connexions.

Cette compréhension est accompagnée, chez les décideurs et les scientifiques, d'une prise de conscience croissante du fait que les questions atmosphériques ne peuvent être résolues séparément. Les activités humaines contribuant au changement climatique et à l'appauvrissement de la couche d'ozone, ou à d'autres problèmes de pollution de l'air, affectent la même atmosphère, qui est une entité très complexe. De ce fait, modifier un de ses aspects peut souvent engendrer des modifications d'autres aspects de ce système atmosphérique. Les activités humaines qui engendrent des changements dans l'atmosphère, aussi minimes soient-ils, peuvent avoir d'énormes répercussions. Il est donc important de prendre en compte les nombreuses interactions qui ont lieu dans l'atmosphère, les scientifiques et les décideurs adoptent de plus en plus une approche globale des questions atmosphériques.

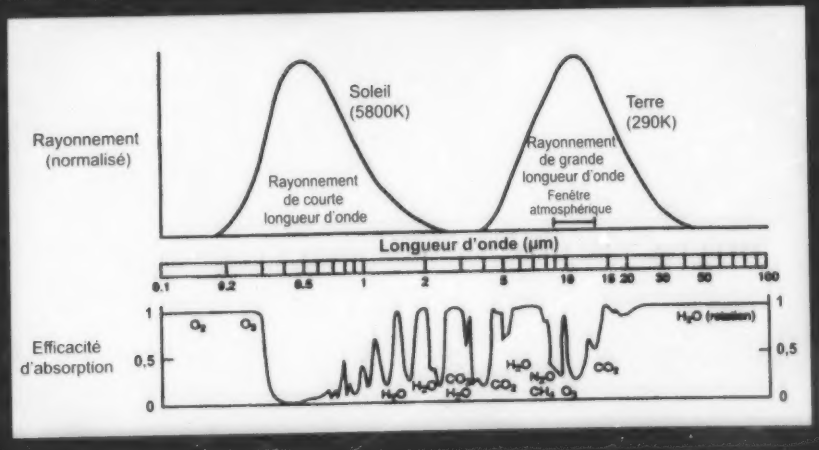
Le lien le plus évident entre l'appauvrissement de l'ozone et le changement climatique est le fait que l'ozone lui-même et certaines des plus importantes substances qui l'appauvrissent, telles que les chlorofluorocarbures (CFC) et les hydrochlorofluorocarbures (HCFC), sont aussi de très puissants gaz à effet de serre. Mais l'appauvrissement de l'ozone et le changement climatique sont unis par d'autres liens, notamment leurs effets sur les processus physiques et chimiques en jeu dans l'atmosphère et les interactions entre l'atmosphère et les autres composantes de l'écosystème mondial.

Figure 3

Figure 3

Figure 4

Figure 4



L'atmosphère
et ses effets radiatifs

Les processus radiatifs influent énormément sur le comportement de l'atmosphère, parce qu'ils régissent la quantité d'énergie qui entre dans le système Terre-atmosphère et qui en sort, et donc la quantité d'énergie disponible pour réchauffer l'air, faire évaporer l'humidité, et mettre en mouvement les masses d'air. Cette énergie entre d'abord dans l'atmosphère sous la forme de rayonnement solaire de courte longueur d'onde, mais est transférée à la troposphère et à la stratosphère de façons très différentes, ce qui confère à ces deux couches de l'atmosphère des structures et des caractéristiques très différentes *(figure 3)*.

La stratosphère, réchauffée du haut vers le bas, est donc plus chaude au sommet qu'à la base. Par conséquent, c'est dans le bas qu'on trouve l'air le plus dense de la stratosphère, il y a peu de mélange vertical, et la [illegible] couche très stable. [illegible] s'ajoute à la [illegible] fort rayonnement [illegible] est absorbé par les [illegible] d'oxygène et les [illegible] des [illegible]

UV-B, intense mais légèrement moins puissant, est intercepté par les molécules d'ozone et les détruit. Un sous-produit avantageux de ces processus est que la majeure partie du rayonnement ultraviolet qui est nocif pour les végétaux et les animaux se trouve filtré dans la stratosphère et n'atteint pas la surface de la Terre. Le fait que l'ozone absorbe du rayonnement infrarouge émis par la surface de la Terre induit aussi un certain réchauffement supplémentaire de la stratosphère.

Dans la troposphère, par contraste, l'atmosphère n'absorbe directement qu'une très faible partie du rayonnement solaire incident. À la place, le rayonnement de courte longueur d'onde réchauffe la surface de la Terre, qui [illegible] ensuite cette [illegible] l'atmo[illegible]

méthane, l'hémioxyde d'azote et l'ozone. En renvoyant une partie de ce rayonnement de grande longueur d'onde vers la surface de la Terre, ces gaz conservent la chaleur dans la couche inférieure de l'atmosphère et contribuent à la rendre plus chaude. C'est grâce à cet effet de serre que la température moyenne de la Terre est de quelque 33 °C plus élevée qu'elle ne le serait autrement, et que la planète peut supporter la vie *(figure 4)*.

Étant ainsi réchauffé, l'air de la troposphère est généralement le plus chaud en surface et se refroidit avec l'altitude. Comme l'air chaud est moins dense que l'air froid, il s'élève et l'air plus frais se déplace sur la surface pour le remplacer. Cet écoulement convectif simple est modifié par la rotation de la Terre, [illegible]istiques de la surface et [illegible] de température entre [illegible] pôles. Il en résulte [illegible] couche d'atmosphère assez tur[illegible] l'air circule [illegible] [illegible], [illegible] l'humidité [illegible] endroit à un autre.

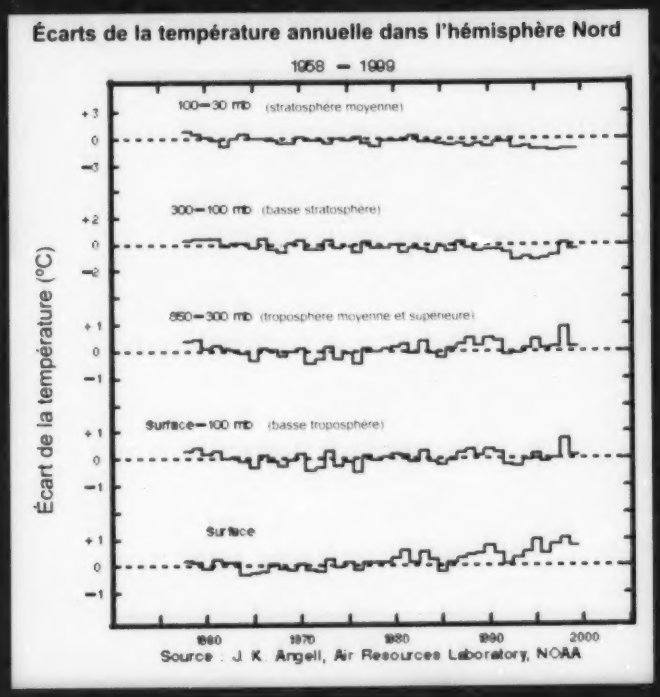


Figure 5

Figure 5. La stratosphère a connu un refroidissement significatif depuis les environs de 1980, surtout à cause de la perte d'ozone, mais aussi à cause de l'accumulation de gaz à effet de serre dans la troposphère. Aux latitudes moyennes de l'hémisphère Nord, la tendance au refroidissement a été considérablement plus grande dans la stratosphère moyenne et supérieure que dans le bas de cette couche.

Figure 6. Des nuages stratosphériques polaires comme celui-ci, photographié en Suède pendant l'hiver 2000, se forment dans la basse stratosphère lorsque les températures tombent en dessous d'environ –80 °C. Ces nuages favorisent des réactions chimiques qui transforment des composés bromés et chlorés stables en substances destructrices de l'ozone plus actives. Le refroidissement de la stratosphère dû au changement climatique et à l'appauvrissement de l'ozone accroît la possibilité que de tels nuages se forment.

Figure 6

Lorsque des substances chimiques qui appauvrissent la couche d'ozone sont libérées dans l'atmosphère, cependant, ces processus radiatifs subissent diverses modifications :

- Étant donné que les substances qui détruisent le plus efficacement l'ozone, comme les CFC et les HCFC, sont aussi de puissants gaz à effet de serre, l'effet de serre se trouve renforcé; la surface de la Terre et la basse troposphère deviennent alors plus chaudes.
- Le réchauffement imputable aux CFC et aux HCFC est cependant compensé en partie par les pertes d'ozone que ces substances chimiques causent dans la basse stratosphère. Comme l'ozone est un gaz à effet de serre, un appauvrissement de l'ozone stratosphérique affaiblit l'effet de serre naturel et refroidit la stratosphère.
- L'amincissement de la couche d'ozone a aussi pour effet que moins de chaleur provenant de l'absorption des UV-B par les molécules d'ozone est transmise à la stratosphère. Cette situation a aussi un effet refroidissant sur la stratosphère.
- Comme il y a dans la stratosphère moins de molécules d'ozone qui peuvent absorber le rayonnement

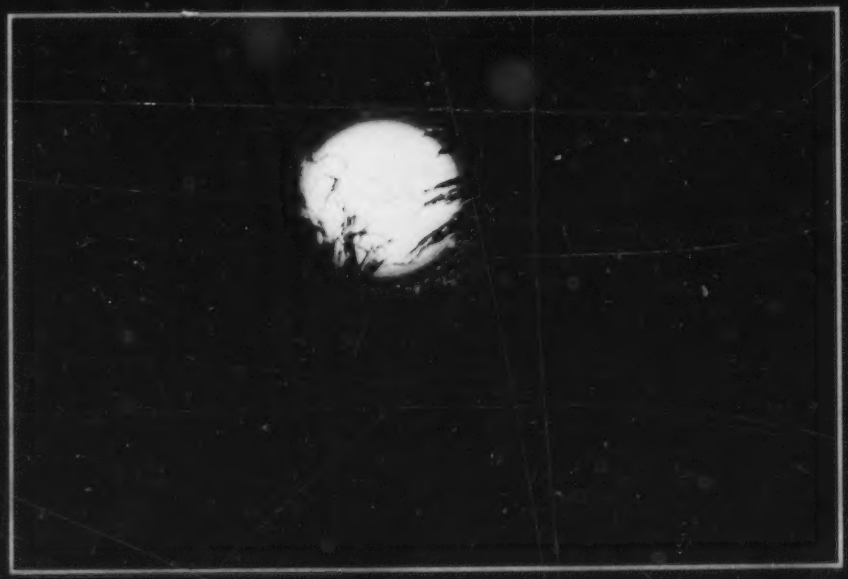
concentrations de gaz à effet de serre augmentent, le flux entrant de rayonnement de grande longueur d'onde augmente et le flux sortant diminue, ce qui entraîne un réchauffement dans la troposphère et un refroidissement dans la stratosphère *(figure 5)*. Bien que tous les gaz à effet de serre contribuent au réchauffement dans la troposphère, leurs effets dans la stratosphère peuvent varier considérablement de l'un à l'autre, selon que la réduction des émissions sortantes qu'ils causent est plus importante au sommet de cette couche ou à la base. C'est le dioxyde de carbone qui refroidit le plus la stratosphère, alors que les CFC, eux, la réchauffent. Le résultat net de l'augmentation des concentrations de tous les gaz à effet de serre reste cependant un refroidissement de la stratosphère.

Le refroidissement de la stratosphère a d'importantes conséquences pour l'appauvrissement de l'ozone, parce qu'il contribue à la formation de nuages stratosphériques polaires (PSC). Ces nuages *(figure 6)*, qui ne se forment qu'à des températures extrêmement basses dans la partie inférieure de la stratosphère pendant la période d'obscurité de l'hiver polaire, constituent un milieu dans lequel

destruction rapide de l'ozone lorsque le soleil revient sur les régions polaires au printemps. Les PSC sont donc un facteur clé du grave appauvrissement de l'ozone qui survient à cette saison dans ces régions.

Les différentes forces de réchauffement et de refroidissement qui découlent de l'appauvrissement de la couche d'ozone et de l'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre ont fait l'objet de mesures à l'échelle planétaire et d'études au moyen de modèles informatiques. Ces études indiquent que le résultat net de toutes ces forces antagonistes est un réchauffement en surface (imputable surtout à l'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre), une élévation faible ou négligeable de la température dans la troposphère moyenne à supérieure, et un refroidissement de la stratosphère (imputable surtout à la perte d'ozone).

Il n'en demeure pas moins que les impacts des gaz à effet de serre et de l'appauvrissement de l'ozone sur le bilan radiatif sont très complexes, et que de nombreuses incertitudes persistent. Divers efforts de recherche sont actuellement en cours pour



La dynamique de l'atmosphère

À mesure que les gaz à effet de serre s'accumulent dans l'atmosphère, ils modifient les différences de température entre les diverses parties du globe et les divers niveaux de l'atmosphère. Les régimes de circulation atmosphérique se trouvent ainsi altérés, et l'on a de bonnes raisons de croire que ces changements de la circulation peuvent accentuer l'appauvrissement de l'ozone au-dessus des pôles en affaiblissant certaines des forces de réchauffement qui agissent sur la stratosphère polaire.

L'une de ces forces, le réchauffement dynamique, est associée à un régime lent de circulation générale dans la stratosphère, dans lequel l'air s'élève graduellement sous les tropiques, se déplace vers les pôles, puis s'enfonce lentement sur ceux-ci *(figure 7)*. À mesure que l'air descend sur les pôles, il se comprime et se réchauffe. L'énergie qui régit cette circulation provient d'ondes planétaires qui remontent de la troposphère. Les ondes planétaires sont causées par des perturbations atmosphériques à grande échelle, elles-mêmes dues aux variations de la façon dont les terres, l'eau et les divers types de surface des terres influent sur le réchauffement et le mouvement de l'air. Elles ont tendance à être plus vigoureuses dans l'hémisphère Nord, parce qu'il présente une plus grande masse terrestre, ce qui fait que la stratosphère est en moyenne plus chaude sur l'Arctique que sur l'Antarctique.

Les ondes planétaires influent aussi sur la stabilité d'un phénomène appelé « vortex polaire ». Les vortex polaires sont des systèmes de vents qui circulent autour des pôles pendant l'hiver; ils isolent la stratosphère polaire, empêchant l'air plus chaud et l'ozone des latitudes inférieures d'y entrer. En raison de cette barrière, la zone située à l'intérieur du vortex devient un milieu extrêmement favorable à la formation de PSC et à un appauvrissement rapide de l'ozone. Avant de se dissiper au printemps, cependant, le vortex peut à l'occasion se briser sous l'effet de fortes ondes planétaires, ce qui permet un apport temporaire d'air plus chaud qui rend les conditions moins propices à une destruction rapide de l'ozone. L'action des ondes planétaires étant plus forte dans l'hémisphère Nord, le vortex de l'Arctique a tendance à être moins stable que celui de l'Antarctique. C'est pourquoi l'Arctique n'a pas encore connu de trous massifs de l'ozone comme ceux qui se forment régulièrement sur l'Antarctique au printemps.

Les études réalisées avec des modèles du climat indiquent cependant que le réchauffement de

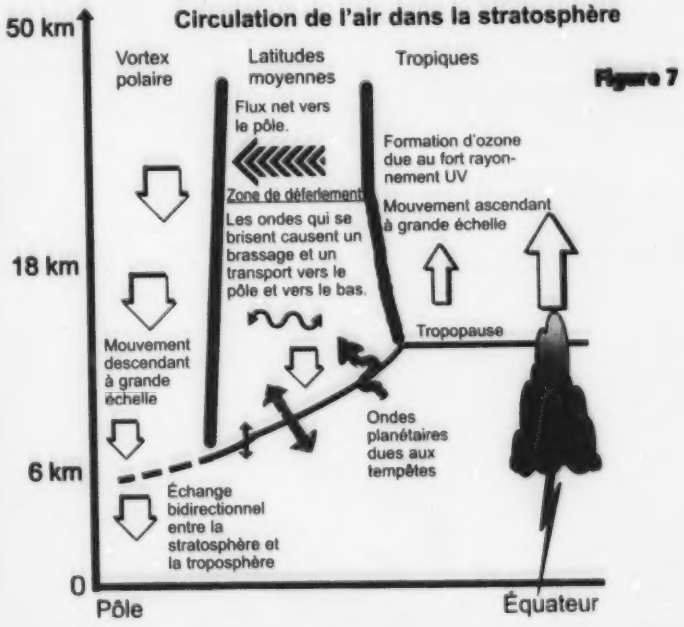


Figure 7

l'atmosphère à proximité de la surface de la Terre et les changements de la circulation ainsi induits pourraient affaiblir les mouvements de ces ondes planétaires, et donc leur effet de réchauffement sur la stratosphère polaire. Si c'était le cas, il s'ensuivrait un renforcement de l'appauvrissement de l'ozone aux deux pôles, mais surtout au-dessus de l'Arctique. Cette situation ralentirait le rétablissement de la couche d'ozone que devrait permettre dans les prochaines décennies la baisse des concentrations stratosphériques de composés destructeurs de l'ozone.

Les recherches révèlent aussi des mécanismes par le biais desquels des changements de la composition de la stratosphère peuvent influer sur le mouvement de l'air dans la troposphère. Les météorologistes savent depuis longtemps que les régimes de la pression atmosphérique à la surface de la Terre varient avec le cycle des taches solaires, mais ils ont eu de la difficulté à expliquer cette connexion, puisque la production totale d'énergie du Soleil ne varie que d'environ 0,1 % sur la totalité du cycle. Des études récentes ont cependant montré que la variation de la production d'énergie solaire est beaucoup plus importante dans la partie UV-C du spectre, et peut atteindre jusqu'à 10 % sur le cycle. Il s'agit là d'une fluctuation suffisante pour avoir un effet notable sur l'abondance de l'ozone dans la stratosphère, que les études ont révélé être d'environ 1,5 % plus élevée au maximum du cycle (lorsque le nombre de taches solaires est le plus grand) qu'à son minimum (nombre de taches le plus bas). Ces changements des abondances de l'ozone entraînent des changements correspondants de la température de la stratosphère, qui à leur tour induisent des modifications de la pression et de la circulation atmosphériques.

De récentes simulations informatiques effectuées au Goddard Institute for Space Studies de la NASA ont montré que des changements dans la circulation stratosphérique peuvent aussi influer sur le flux descendant d'énergie dans la troposphère, où il peut avoir une incidence sur les régimes de pression et de circulation. Ces changements peuvent modifier la position du courant-jet, qui régit la trajectoire des systèmes météorologiques dans la troposphère, et dont un faible décalage peut modifier considérablement les climats régionaux. Des études initiales menées à l'aide de modèles, par exemple, suggèrent que les augmentations d'abondance de l'ozone stratosphérique pourraient diriger davantage de tempêtes vers le Canada. Il faudra cependant poursuivre les travaux pour déterminer par quels mécanismes l'appauvrissement à long terme de la couche d'ozone affecte les régimes météorologiques en surface.

Smog sur la vallée du bas Fraser

La chimie de l'atmosphère

L'appauvrissement de l'ozone est largement une question de chimie de l'atmosphère, mais les processus chimiques jouent aussi un rôle important dans le changement climatique, surtout dans la formation et la dissociation de certains gaz à effet de serre. La chimie de l'appauvrissement de l'ozone et celle du changement climatique ont des interactions significatives sur au moins deux plans.

L'une prend place par le biais de la photochimie – des processus chimiques qui sont régis par l'énergie du Soleil. Nombre des principales réactions en jeu dans l'atmosphère sont de cet ordre, et la quantité d'ozone présente dans la stratosphère influe sur la vitesse de ces réactions, parce qu'elle détermine la quantité de rayonnement ultraviolet-B (UV-B) solaire de grande énergie qui atteint l'atmosphère à proximité du sol. Cet état de choses a des répercussions considérables sur le changement climatique, parce que l'ozone au niveau du sol (troposphérique), important gaz à effet de serre et composante du smog, est un produit de la photochimie *(figure 8)*. À mesure que la couche d'ozone s'amincit et qu'une plus grande quantité de rayonnement ultraviolet atteint la surface de la Terre, les réactions photochimiques qui produisent l'ozone troposphérique peuvent se dérouler avec plus de vigueur. Les valeurs moyennes de l'ozone au-dessus du Canada sont actuellement d'environ 6 % inférieures à celles d'avant 1980. Les scientifiques estiment que cette baisse a entraîné une augmentation d'environ 7 % de la quantité de rayonnement UV-B qui atteint la surface de la Terre. Une recherche effectuée récemment à l'aide d'un modèle informatique indique qu'un accroissement du rayonnement UV causera une augmentation de l'ozone troposphérique dans les régions urbaines polluées, où l'on rencontre des concentrations élevées d'oxydes d'azote, de monoxyde de carbone et d'hydrocarbures.

L'autre lien fait intervenir un composé hautement réactif de courte durée de vie, le radical hydroxyle (OH), qui est produit par la dissociation photochimique de l'ozone en présence de vapeur d'eau. OH est un capteur atmosphérique qui réagit avec de nombreux polluants et les extrait de l'atmosphère. Ces polluants sont entre autres le méthane, un gaz à effet de serre, le méthylchloroforme, un destructeur de l'ozone, et d'autres gaz, comme les hydrochlorofluorocarbures (HCFC) et les hydrofluorocarbures (HFC), qui sont à la fois des destructeurs de l'ozone et des gaz à effet de serre. De plus, OH réagit avec une foule d'autres polluants, dont le monoxyde de carbone, les composés organiques volatils, et divers oxydes d'azote. Certains craignent que la demande en radical hydroxyle dans une atmosphère très polluée ne fasse baisser les concentrations de OH, ce qui réduirait l'efficacité avec laquelle le méthane et divers composés destructeurs de l'ozone sont retirés de l'atmosphère. Un ralentissement de l'élimination de ces composés intensifierait le processus du changement climatique et ralentirait le rétablissement de la couche d'ozone. Bien qu'il soit impossible d'estimer avec un degré élevé de certitude l'abondance planétaire du radical hydroxyle, certaines indications récentes suggèrent que les concentrations de OH ont subi une baisse significative dans les années 1990 et qu'on peut s'attendre à ce que la situation se poursuive dans les dix prochaines années.

Figure 8

Source : Ministère de l'Environnement de l'Ontario (ozone) et Environnement Canada (Indice UV)

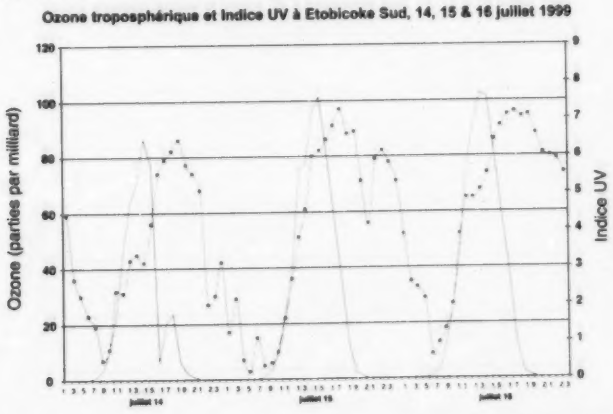
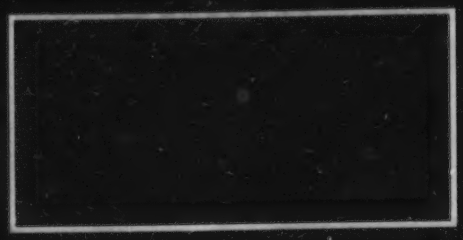


Figure 8



Les liens biogéochimiques : impact de l'augmentation du rayonnement UV

Tant les modifications du climat que les changements de l'intensité du rayonnement ultraviolet peuvent avoir des impacts considérables sur les processus biologiques, géologiques, chimiques et physiques qui régissent les échanges de matière et d'énergie entre les principaux compartiments de l'environnement – l'atmosphère, la biosphère, l'hydrosphère et la lithosphère. Le mieux connu de ces échanges est probablement le cycle du carbone, dans lequel le carbone circule continuellement entre l'atmosphère, les océans, les organismes vivants, et les roches et les sols, allant d'une forme presque totalement élémentaire, comme le charbon de bois ou la houille, à un gaz simple comme le dioxyde de carbone, ou à l'un des nombreux composés organiques lorsqu'il passe d'un réservoir environnemental à un autre.

Le cycle du carbone est un élé- problème du ue; en effet, la du

combustion de combustibles fossiles et le déboisement, est largement responsable de l'actuelle augmentation des concentrations atmosphériques de dioxyde de carbone, le gaz à effet de serre anthropique le plus abondant. En ce qui concerne l'atmosphère, un des liens les plus importants dans le cycle du carbone est ce qu'on appelle la « pompe biologique » aquatique. Il s'agit du processus par lequel le plancton (les plantes et animaux microscopiques qui vivent près de la surface des océans et des lacs) extrait le carbone de l'air et, après sa mort, le dépose sur le fond de ces océans et lacs. Or, l'amincissement de la couche d'ozone, en particulier les épisodes graves comme les trous d'ozone printaniers en Antarctique, pourrait menacer sérieusement ce processus, parce que le plancton ne peut pas s'abriter du rayonnement solaire. Une baisse considérable de l'abondance du plancton consécutive à l'exposition à un rayonnement ultraviolet plus intense pourrait donc faire baisser la vitesse à laquelle le dioxyde de carbone est retiré de l'atmosphère.

De changements biolo chés par les modifications du climat pourraient influer sur l'appauvrissement de l'ozone. Le chlorure de méthyle et le bromure de méthyle, par exemple, sont deux substances destructrices de l'ozone que l'on cesse graduellement de produire et d'utiliser, en application du Protocole de Montréal. Cependant, comme les sources naturelles de ces gaz sont plus importantes que les sources industrielles, tout facteur influant sur les écosystèmes et les processus naturels qui produisent ces gaz pourrait aussi avoir des incidences sur la couche d'ozone. Il reste beaucoup à apprendre sur ces sources naturelles, mais les marais côtiers semblent être des contributeurs importants. Les champignons, des cultures comme le colza, et les sols riches en matière organique sont aussi soupçonnés d'en être des sources considérables. Le réchauffement de l'atmosphère et des océans, ou un changement du niveau marin, pourrait avoir un impact sur toutes ces sources en modifiant les écosystèmes et les conditions climatiques qui régissent la production naturelle de ces gaz. Le changement climatique pourrait aussi influer sur la vitesse à laquelle ces gaz sont retirés de l'atmosphère par les océans. Les études de la production et de l'extraction naturelles de ces gaz en sont cependant à leurs tout débuts, et il n'est pas encore possible de fier comment le changement que pourrait modifier leurs dances dans l'atmosphère.

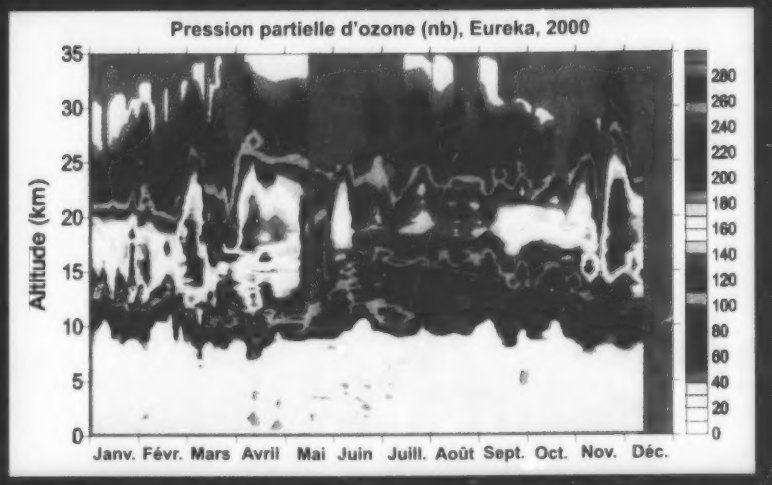


Figure 9

Figure 9 Les données d'ozonosondage recueillies à Eureka en 2000 montrent le cycle annuel de l'ozone, les niveaux les plus élevés survenant en hiver et au début du printemps, et les plus bas en été. Le graphique montre aussi des niveaux d'ozone inhabituellement bas à la fin de mars et au début d'avril aux altitudes d'environ 15 à 20 km. On pense que la présence de cette zone d'appauvrissement est due à des niveaux élevés de chlore et de brome dans une stratosphère arctique très froide.

Figure 10. À l'observatoire d'Environnement Canada situé à Alert, sur l'île d'Ellesmere, dans le haut-Arctique, on surveille quotidiennement les concentrations de fond de gaz à effet de serre, de substances destructrices de l'ozone et d'aérosols.

Figure 10

La recherche et la surveillance au Canada

Avec sa Division des études expérimentales, la Direction de la recherche sur la qualité de l'air d'Environnement Canada est engagée dans diverses activités qui aident à mieux comprendre l'appauvrissement de l'ozone et ses interactions avec le changement climatique. Certaines de ces activités sont des projets de recherche conçus pour acquérir de nouvelles connaissances sur les composants et processus de l'atmosphère. D'autres sont des programmes de surveillance à long terme visant à fournir un long enregistrement continu des conditions atmosphériques qui puisse constituer une base fiable pour identifier les tendances et changements dans la composition et le comportement de l'atmosphère. Ces activités, qui aident aussi à évaluer l'efficacité des mesures adoptées en application du Protocole de Montréal et à élaborer des stratégies pour l'avenir, sont menées par le biais d'installations et programmes clés.

Surveillance de l'ozone depuis le sol et ozonosondes

Depuis les années 1950, des scientifiques canadiens utilisent des instruments au sol pour mesurer les quantités d'ozone total. Les mesures sont actuellement faites à 12 sites répartis sur le territoire du Canada, avec le spectrophotomètre d'ozone Brewer, un appareil développé au Canada. Trois de ces instruments sont installés dans le haut-Arctique, à Resolute Bay, Eureka et Alert. Le réseau Brewer est une source fondamentale d'information sur les changements de l'état de la stratosphère. Sur un plan plus pratique, il fournit aussi des données qui sont utilisées pour produire les prévisions et rapports de l'indice UV.

Ces mesures au sol sont complétées par les données recueillies par de petits capteurs emportés par ballon, les ozonosondes. D'un poids d'environ 3 kg, ces nacelles instrumentées fournissent des mesures en continu des concentrations d'ozone jusqu'à une altitude de quelque 20 km *(figure 9)*.

Observatoires de l'Arctique

En 1992, Environnement Canada a construit l'Observatoire de l'ozone stratosphérique du haut-Arctique, près de la station météorologique d'Eureka, sur l'île d'Ellesmere. L'observatoire est le principal centre de recherche atmosphérique dans l'Arctique, et un élément de premier rang du Réseau pour la détection de changements stratosphériques, un ensemble international de stations au sol de grande qualité qui mesurent l'état physique et chimique de la stratosphère. L'observatoire d'Eureka est équipé d'instruments qui mesurent l'ozone, le dioxyde d'azote, et d'autres substances jouant un rôle important dans la chimie de l'atmosphère. Le Canada exploite, à Alert, sur l'île d'Ellesmere également, un autre observatoire *(figure 10)* qui assure une surveillance continue des concentrations de fond de gaz à effet de serre, de substances destructrices de l'ozone, et d'aérosols (particules en suspension dans l'atmosphère). L'analyse de ces données fournit des informations sur la variabilité à long terme de ces substances et aide à mieux comprendre l'impact des activités humaines sur l'atmosphère.

L'observatoire d'Alert est une station de référence officielle du programme Veille de l'atmosphère du globe (VAG) de l'Organisation météorologique mondiale; il y a une vingtaine de ces stations réparties sur la planète. L'objectif de la VAG est de rendre disponibles les mesures des concentrations de fond actuelles de certains éléments de l'atmosphère et des conditions physiques qui les accompagnent, pour toutes les grandes régions du globe. Le programme canadien de référence (Canadian Baseline Program) a débuté à Alert en 1975, avec des mesures simples du dioxyde de carbone. Il a ensuite été élargi et, en 1998, incluait des mesures d'autres gaz à effet de serre, comme le méthane, l'ozone et les chlorofluorocarbures.

Études sur le rayonnement (observatoire de Bratt's Lake)

L'observatoire de Bratt's Lake, situé à environ 20 km au sud de Regina, est le volet canadien du Réseau de référence pour la mesure du rayonnement en surface du Programme mondial de recherche sur le climat. Ce réseau se compose d'une quarantaine de stations, réparties sur les sept continents, qui effectuent des mesures très précises du rayonnement solaire et infrarouge *(figure 11)*. Étant donné que c'est l'énergie du rayonnement solaire de courte longueur d'onde et du rayonnement infrarouge de grande longueur d'onde émis par la surface de la Terre et l'atmosphère qui régissent le système climatique de la Terre, cette information peut donner des indications de la manière dont les changements des flux d'énergie radiative influent sur le changement climatique aux échelles régionale et planétaire. L'observatoire de Bratt's Lake, qui fonctionne depuis le milieu des années 1990, fournit aux chercheurs un milieu relativement non pollué dans une région où le climat devrait changer significativement avec l'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre.

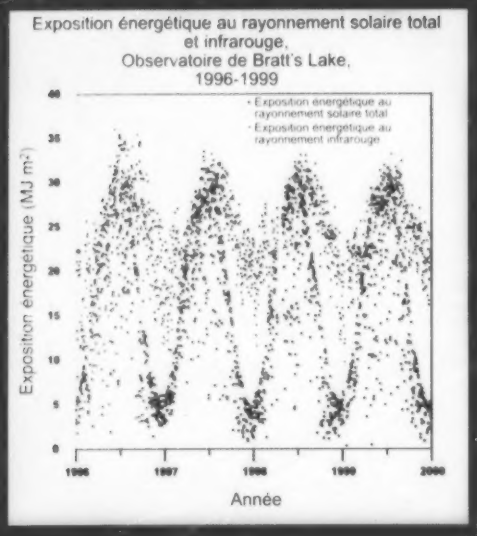


Figure 11

Source : B. Arthur, Environnement Canada

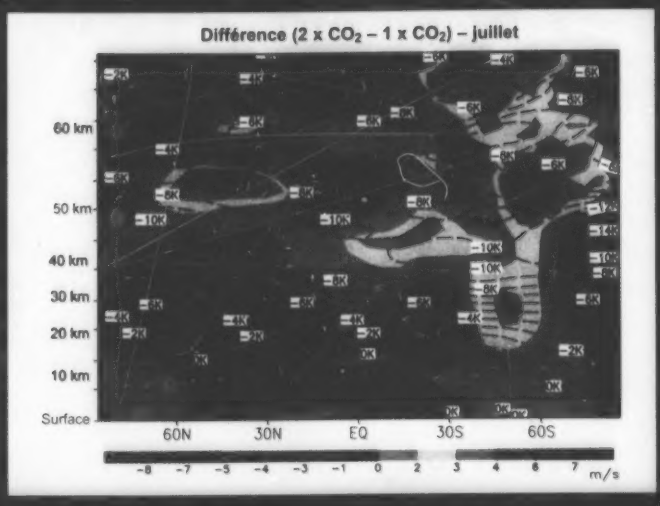


Figure 12

Source : [illegible]

Figure 11. Les mesures des quantités quotidiennes de rayonnement solaire et infrarouge qui atteignent la surface de la Terre devraient permettre de détecter des tendances temporelles. Le pointage de 4 ans présenté ici montre peu de changement, que ce soit du rayonnement solaire ou du rayonnement infrarouge, d'un été à l'autre. Au cours des 4 hivers, cependant, le rayonnement solaire a diminué et le rayonnement infrarouge augmenté. Ces changements peuvent être dus à une augmentation de la couverture nuageuse en hiver. Il faudra toutefois disposer de bien plus d'années de données avant qu'on puisse déterminer si cette situation s'inscrit dans une tendance à long terme ou est simplement due à la variabilité naturelle à court terme du climat.

Figure 12. Bien que l'augmentation des concentrations de gaz à effet de serre entraîne un réchauffement à la surface de la Terre, elle peut causer un refroidissement dans la stratosphère. Le graphique présente ici montre les effets potentiels d'un doublement des concentrations atmosphériques de dioxyde de carbone sur les températures et les vents stratosphériques pendant l'été, tels que les estime le modèle canadien de l'atmosphère moyenne. Les changements de la température sont indiqués par les lignes tirétées en degrés Kelvin (1°K est égal à 1 °C, mais l'échelle Kelvin commence au zéro absolu soit −273 °C). Les changements de la vitesse des vents sont indiqués par les couleurs. Le modèle montre que le refroidissement le plus marqué survient près du sommet de la stratosphère et que la baisse des températures dans la haute stratosphère au-dessus de l'Antarctique peut atteindre 14 °K.

Figure 13. Ce graphique montre les quantités quotidiennes moyennes de rayonnement ultraviolet B reçues à Toronto, Edmonton et Churchill pour chaque année depuis 1965. Les valeurs pour la fin des années 1980 sont dérivées de mesures réelles. Les valeurs antérieures sont des estimations dérivées d'informations météorologiques connexes par un modèle statistique. Les quantités d'UV-B commencent à augmenter considérablement à tous les endroits au début des années 1980, peu après le moment où l'on pense que la couche d'ozone a commencé à s'appauvrir. L'augmentation constatée à Churchill a cependant été plus élevée qu'aux deux autres sites, on pense que cette situation est due à des facteurs climatiques, mais il n'est pas encore certain que ceux-ci soient liés à un changement climatique à long terme.

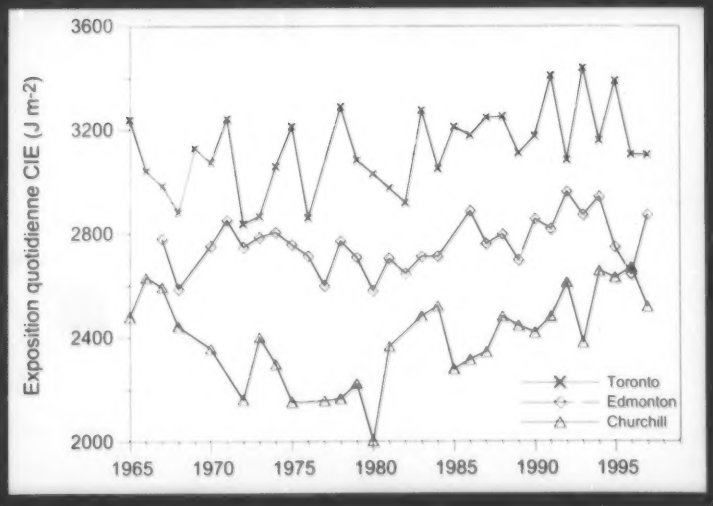


Figure 13

Source : J. Kerr, Environnement Canada

Recherche sur l'ozone à l'aide de ballons instrumentés

Depuis 20 ans, Environnement Canada collabore avec l'Agence spatiale canadienne et des partenaires des universités et de l'industrie pour recueillir des données sur les composés azotés réactifs, les composés chlorés et bromés, l'ozone, les aérosols et d'autres substances qui jouent un rôle clé dans la chimie de la haute troposphère et de la stratosphère. Ces travaux sont coordonnés via le programme d'évaluation des tendances de l'azote dans l'atmosphère moyenne (Middle Atmosphère Nitrogen Trend Assessment, ou MANTRA). La collecte des données est effectuée à l'aide d'énormes ballons de polyéthylène, d'une hauteur d'environ 20 étages, qui emportent des instruments jusqu'à des altitudes de 30 à 40 km en général. Les instruments balaient l'horizon terrestre à diverses altitudes et enregistrent les spectres produits par la diffusion de la lumière solaire. À la fin du vol, la charge utile instrumentée se sépare du ballon et redescend, freinée par un parachute, jusqu'à la surface, où elle peut être récupérée. L'analyse des données enregistrées fournit alors des informations sur la composition chimique de l'atmosphère à différentes altitudes. L'information recueillies lors des vols MANTRA non seulement contribue à améliorer la compréhension des processus stratosphériques, mais aussi aide les gouvernements à déterminer l'efficacité des mesures visant les substances destructrices de l'ozone qui ont été mises en place en application du Protocole de Montréal.

Modèle canadien de l'atmosphère moyenne

La modélisation informatique est pour les chercheurs un outil important qui les aide à améliorer leur compréhension des processus atmosphériques, à étudier l'impact des changements naturels et anthropiques survenus dans l'atmosphère, et à faire des prédictions à long terme des changements à venir. Le modèle canadien de l'atmosphère moyenne (MAM), développé conjointement par des scientifiques d'Environnement Canada et des universités, fournit une représentation sophistiquée des grands processus physiques et chimiques en jeu dans la haute troposphère et la stratosphère. Il a récemment été utilisé pour étudier la façon dont changerait l'atmosphère moyenne si la concentration atmosphérique de dioxyde de carbone était du double des valeurs actuelles. Les résultats de cette étude suggèrent qu'un accroissement du dioxyde de carbone entraînera indirectement un refroidissement de l'atmosphère moyenne, puisque les autres régions de l'atmosphère émettront davantage de rayonnement vers l'espace. Ces résultats concordent avec les observations effectuées ces dernières décennies, qui montrent une tendance au refroidissement dans certaines parties de l'atmosphère moyenne. Même si l'on estime que la plus grande partie du refroidissement observé dans la stratosphère est imputable à l'appauvrissement de la couche d'ozone, une partie pourrait cependant être due à l'augmentation des concentrations de dioxyde de carbone *(figure 12)*. Les résultats montrent aussi des changements faibles mais significatifs de la distribution de l'ozone dans l'atmosphère moyenne qui sont dus à l'accroissement du dioxyde de carbone.

UV – climatologie et recherche

Les mesures de l'intensité du rayonnement UV qui atteint la surface de la Terre ne sont prises de façon régulière au Canada que depuis l'introduction du spectrophotomètre Brewer, à la fin des années 1980. Lorsque, dix ans plus tard, les chercheurs d'Environnement Canada ont entrepris d'estimer les tendances à long terme du rayonnement UV, l'enregistrement était encore trop court pour qu'on puisse en tirer des résultats fiables. Pour surmonter ce problème, ils ont développé des modèles statistiques qui estiment l'irradiance UV à l'aide d'une combinaison de données antérieures sur le [illegible]cement solaire, les niveaux [illegible]riel, la température de [illegible]

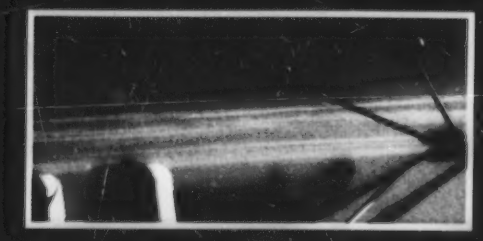
Les implications pour les politiques

Grâce au Protocole de Montréal, signé en 1987, et aux divers amendements qui lui ont été apportés depuis, les concentrations de CFC, de halons et d'autres importantes substances appauvrissant la couche d'ozone (SACO) sont maintenant en train de baisser. On peut penser que, à mesure qu'elles continueront de décroître pendant le prochain siècle, les effets de l'appauvrissement de l'ozone stratosphérique sur le changement climatique commenceront à s'atténuer. Si le Protocole est pleinement respecté, les concentrations de SACO à la fin du présent siècle devraient avoir baissé au point de ne plus constituer une menace significative pour la couche d'ozone. Cependant, il est peu probable que l'on en arrive à une observance totale du Protocole; il est donc presque certain que le rétablissement de la couche d'ozone demandera plus de temps. Les effets de l'appauvrissement de l'ozone sur le changement climatique vont aussi durer plus longtemps si les CFC sont remplacés par des substituts tels que les hydrofluorocarbures (HFC), qui sont de puissants gaz à effet de serre. L'effet de serre dû à ces substances viendrait en outre s'ajouter à celui des substances destructrices de l'ozone plus anciennes encore présentes dans l'atmosphère.

Bien que les concentrations atmosphériques de SACO soient à la baisse, celles d'importants gaz à effet de serre, comme le dioxyde de carbone et le méthane, qui n'ont pas de lien direct avec l'appauvrissement de l'ozone, continuent de s'accroître. Or, des concentrations plus élevées de ces gaz peuvent avoir pour effet d'allonger le temps de rétablissement de la couche d'ozone, surtout à cause de leurs effets sur le refroidissement de la stratosphère et donc sur la formation de nuages stratosphériques polaires. De récentes simulations informatiques appuient cette idée, et suggèrent que, avec les augmentations prévues des concentrations de gaz à effet de serre, le grave appauvrissement de l'ozone aux pôles pourrait durer 10 à 20 [illegible] plus que si les concentrat[illegible] gaz à effet de serre étaie[illegible] aux niveaux antérieurs [illegible] sont cependant très [illegible] et il faudra procéder [illegible] travaux, avec des [illegible] raffinés.

Sous l'angle [illegible] est clair que les [illegible] atténuer le [illegible] peuvent avo[illegible] l'appauvri[illegible] inverseme[illegible] veiller à é[illegible] problème[illegible] décideur[illegible] déjà au[illegible] ficulté [illegible] placem[illegible] halons [illegible] trices [illegible] graduel[illegible] du Proto[illegible] actuel[illegible] qui o[illegible] de l'[illegible] mais sont de puissants gaz à effet de serre, illustrent bien la nécessité de prendre en compte les implications sur les deux aspects de la question.

Mais il reste d'autres problèmes. En particulier, que devrions-nous faire face aux HFC et autres gaz à effet de serre que l'on [illegible] tement en [illegible] des CFC [illegible] bien que [illegible] [illegible]ons dans l'atmo- [illegible] encore relativement [illegible] peut s'attendr[illegible] [illegible]



A l'observatoire de Bratt's Lake, le spectrophotomètre Brewer (au premier plan) mesure le rayonnement ultraviolet et l'épaisseur de la couche d'ozone, et les suiveurs solaires mesurent le rayonnement solaire diffus.

Les recherches nécessaires

Pour ce qui est des recherches, elles devront enrichir les connaissances sur la manière dont interagissent la troposphère et la stratosphère. Parmi les plus importantes questions présentement étudiées figurent les suivantes :

- *Quels sont les principaux mécanismes de couplage entre la troposphère et la stratosphère, et comment influent-ils sur le climat?* Nous savons, par exemple, que la structure thermique verticale de la troposphère est sensible aux changements de celle de la stratosphère. Nous savons aussi que des ondes se propageant vers le haut à partir de la troposphère montent jusque dans la stratosphère et y influent sur les températures et sur la circulation. De même, des ondes nées dans la stratosphère peuvent se propager vers le bas, et influer sur les conditions météorologiques dans la troposphère. En étudiant plus avant ces mécanismes, nous améliorerons notre compréhension de la façon dont les conditions qui règnent dans la stratosphère ont une incidence sur le climat dans la troposphère, et réciproquement.
- *Comment les changements des structures thermiques verticales de la troposphère et de la stratosphère influent-ils sur le climat?* Depuis 30 ans, les chercheurs constatent un refroidissement de la stratosphère et un réchauffement de la basse troposphère. Ces changements pourraient faire varier la hauteur de la tropopause, qui est la limite entre la troposphère et la stratosphère. Cette variation pourrait à son tour influer sur la hauteur des courants de convection au sein de la troposphère, comme ceux qui accompagnent les orages, et donc possiblement sur l'intensité de ceux-ci. Elle pourrait aussi modifier les positions des courants-jets sur la planète, et donc le déplacement des systèmes météorologiques.
- *Comment les changements des concentrations d'aérosols dans la troposphère influeront-ils sur la quantité de rayonnement solaire qui atteindra la surface de la Terre?* Les aérosols sont de minuscules particules et gouttelettes en suspension dans l'atmosphère, qui proviennent de sources naturelles ou anthropiques. Pendant la plus grande partie du XX^{e} siècle, les activités industrielles ont considérablement fait monter la charge atmosphérique d'aérosols, surtout de sulfates. Comme les sulfates sont à l'origine des pluies acides ainsi que de problèmes de santé humaine, les émissions de ces composés ont été substantiellement réduites en Europe et en Amérique du Nord depuis les années 1970. Bien que, dans d'autres régions du monde, les émissions aient augmenté avec l'industrialisation, on s'attend à ce qu'elles finissent par y diminuer, pour les mêmes raisons. Les aérosols de sulfates réfléchissent le rayonnement solaire vers l'espace, ce qui a un effet de refroidissement à la surface de la Terre, et réduit la quantité d'ultraviolets qui traversent l'atmosphère. À mesure que la quantité d'aérosols sulfatés présents dans l'atmosphère baissera, cependant, le réchauffement en surface pourra augmenter, puisqu'il y aura plus de rayonnement solaire qui y parviendra. De plus, cet accroissement du rayonnement solaire total sera accompagné d'un accroissement du rayonnement ultraviolet atteignant la surface de la planète. Comme le rayonnement ultraviolet contrôle la formation d'ozone troposphérique, qui est à la fois un gaz à effet de serre et un important composant du smog, la réduction des concentrations de sulfates pourrait modifier encore le réchauffement par effet de serre, et créer des problèmes de qualité de l'air en bien des endroits.
- *Comment le refroidissement de la stratosphère influera-t-il sur la formation de trous de l'ozone?* Depuis qu'ils ont été découverts en 1985, les trous d'ozone de l'Antarctique sont toujours de plus en plus grands. Celui qui s'est formé en septembre 2000 était, au moment où le présent document a été rédigé, le plus vaste jamais constaté, avec une superficie de 28,3 millions de kilomètres carrés, soit un peu plus que l'Amérique du Nord et un peu moins que l'Afrique *(figure 14)*. Il s'étendait vers le nord jusqu'à la pointe sud de l'Amérique du Sud; Ushuaia (Argentine) et Punta Arenas (Chili), une ville de plus de 100 000 habitants, se sont ainsi trouvées exposées à des niveaux de rayonnement ultraviolet très élevés pour cette époque de l'année. Depuis le début des années 1990, un grave appauvrissement de l'ozone a été détecté à quelques reprises dans la stratosphère de l'Arctique au printemps de 2000 [illegible] niveau d'ozone [illegible] baissé de [illegible] de 18 [illegible] l'ozone [illegible]

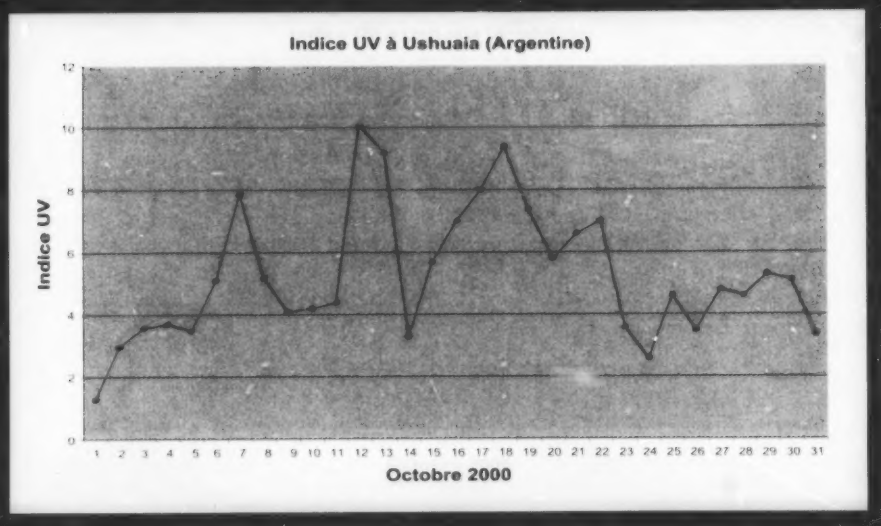


Figure 14
Source : NASA (États-Unis), Service Météorologique National Argentine (SMN)

Figure 14. C'est en septembre 2000 que le trou d'ozone de l'Antarctique a atteint son extension maximale de tous les temps, et qu'il s'est étendu pour la première fois au dessus de grandes regions habitées du sud de l'Amerique du Sud. L'indice UV à Ushuaia, en Argentine, a été aux environs ou au dessus de 8 pendant cinq journées différentes, et atteint 10 le 12 octobre. L'indice UV en octobre à Ushuaia se situe normalement aux alentours de 4. Les valeurs supérieures à 10 ne se rencontrent généralement que dans les regions tropicales.

effet de serre et d'ozone stratosphérique influeront sur les températures de la stratosphère polaire avant de pouvoir prédire avec confiance les tendances futures de la formation de trous d'ozone.

- *Comment les changements de la quantité de vapeur d'eau présente dans l'atmosphère influeront-ils sur le changement climatique et l'appauvrissement de l'ozone?* La vapeur d'eau est le gaz à effet de serre le plus abondant dans l'atmosphère. Dans la stratosphère, la vapeur d'eau des nuages stratosphériques polaires agit également comme un catalyseur qui accentue l'appauvrissement de l'ozone. Comme l'atmosphère peut retenir plus de vapeur d'eau quand elle est plus chaude, le réchauffement par effet de serre pourrait faire croître la quantité de vapeur d'eau dans l'atmosphère, ce qui aurait d'importantes incidences à la fois sur le climat et sur l'appauvrissement de l'ozone. Les scientifiques doivent donc déterminer si la quantité de vapeur d'eau dans l'atmosphère est effectivement à la hausse et, si oui, comment elle est répartie entre les diverses régions de l'atmosphère.
- *Quel effet les baisses de la charge atmosphérique de chlore et de brome auront-elles sur le changement climatique et l'appauvrissement de l'ozone?* Avec la baisse des abondances de chlore et de brome dans la stratosphère, les concentrations d'ozone dans cette couche

aura une incidence sur les températures de l'atmosphère. Les données des systèmes de surveillance qui suivent les concentrations de l'ozone et d'autres grandes caractéristiques de l'atmosphère aideront à vérifier que les changements attendus se produisent effectivement et à accroître notre compréhension d'autres changements qui pourraient survenir.

Nombre des initiatives de recherche qui se penchent sur ces aspects et d'autres questions connexes se déroulent dans le cadre du projet Processus stratosphériques et leur rôle dans le climat (en anglais Stratospheric Processes and Their Role in Climate, ou SPARC) du Programme climatologique mondial, projet lancé en 1992. Le projet englobe un certain nombre d'études conçues pour améliorer la compréhension scientifique des connexions physiques, chimiques et radiatives entre la troposphère et la stratosphère, et leurs effets sur le climat. L'actuel programme de recherches de SPARC vise des domaines tels que les indicateurs stratosphériques du changement climatique, la physique et la chimie de l'appauvrissement de l'ozone, l'influence des changements de l'ozone sur le climat, les échanges d'énergie et de gaz entre la trposphère et la stratosphère, et les ondes planétaires.

Un autre important domaine d'activité, dans lequel SPARC est très impliqué, vise à améliorer la manière dont les modèles informatiques de l'atmosphère représentent les grands liens

climatique. Il s'agit

représenter la

modèles de circu-

changement climatique et de mieux reproduire les ondes planétaires. Une fois ces raffinements apportés, non seulement nous connaîtrons mieux les interactions entre l'appauvrissement de l'ozone et le changement climatique, mais aussi nous comprendrons mieux comment ces liens, en même temps que tous les autres facteurs intervenant dans le changement climatique, influeront sur l'état futur tant de la couche d'ozone que du climat en surface.

De plus en plus, les actions de la communauté scientifique et de celle des politiques prennent en compte le fait que l'atmosphère ne peut pas être perçue comme une série de compartiments distincts, où les phénomènes se déroulent en vase clos. Au contraire, les chercheurs et les décideurs ont une perspective plus globale de l'atmosphère, la considérant comme un tout dynamique dont l'état à un moment donné dépend d'un réseau complexe d'interactions, non seulement entre ses divers éléments et processus, mais aussi avec ceux d'autres composants de l'écosphère.

Pour bien prendre en compte ces interactions, les scientifiques de l'atmosphère regardent de plus en plus à l'extérieur de leurs propres spécialités et collaborent plus étroitement avec des experts d'autres domaines. L'évolution d'approches plus intégrées à l'appauvrissement de l'ozone et au changement climatique – ainsi qu'à d'autres problèmes atmosphériques – est en train d'accroître notre capacité de comprendre et d'atténuer les énormes changements que les activités humaines ont imposés à l'atmosphère terrestre depuis 200 ans. Non seulement ces approches nous aideront à lutter plus efficacement contre les problèmes d'aujourd'hui, mais aussi elles nous

nneront une meilleure chance de

ir et limiter les autres menaces

e l'homme pour l'atmosphère qui

ent survenir dans l'avenir.

Une approche intégrée aux problèmes atmosphériques s'impose aussi, parce que les écosystèmes et la santé humaine ne sont pas affectés par un seul de ces problèmes, mais bien par tous. L'étonnant déclin des populations d'amphibiens, par exemple, est peut-être imputable à des stress multiples liés aux précipitations acides, aux polluants organiques persistants et à un certain nombre d'autres problèmes de pollution. L'augmentation des niveaux d'UV (due à l'appauvrissement de l'ozone) et des changements de niveau des eaux peu profondes (dus au changement climatique) pourraient aussi être des facteurs de ce déclin, puisqu'ils rendent les œufs d'amphibiens plus susceptibles aux champignons aquatiques, ce qui tue les embryons.

Les connexions

De plus en plus, les actions de la communauté scientifique et de celle des politiques prennent en compte le fait que l'atmosphère ne peut pas être perçue comme une série de compartiments distincts, où les phénomènes se déroulent en vase clos. Au contraire, les chercheurs et les décideurs ont une perspective plus globale de l'atmosphère, la considérant comme un tout dynamique dont l'état à un moment donné dépend d'un réseau complexe d'interactions, non seulement entre ses divers éléments et processus, mais aussi avec ceux d'autres composants de l'écosphère.

Pour bien prendre en compte ces interactions, les scientifiques de l'atmosphère regardent de plus en plus à l'extérieur de leurs propres spécialités et collaborent plus étroitement avec des experts d'autres domaines. L'évolution d'approches plus intégrées à l'appauvrissement de l'ozone et au changement climatique - ainsi qu'à d'autres problèmes atmosphériques - est en train d'accroître notre capacité de comprendre et d'atténuer les énormes changements que les activités humaines ont imposés à l'atmosphère terrestre depuis 200 ans. Non seulement ces approches nous aideront à lutter plus efficacement contre les problèmes d'aujourd'hui, mais aussi elles nous donneront une meilleure chance de prévoir et limiter les autres menaces de l'homme pour l'atmosphère qui pourraient survenir dans l'avenir.

Bibliographie

Angell, J.K. 2000. Global, hemispheric, and zonal temperature deviations derived from radiosonde records. In *Trends Online: A Compendium of Data on Global Change*. Oak Ridge, Tennessee: Carbon Dioxide Information Analysis Center, Oak Ridge National Laboratory, U.S. Department of Energy.

Bernard, S.M., J. Samet, A. Grambsch, K. Ebi, and I. Romieu. 2001. The Potential Impacts of Climate Variability and Change on Air Pollution-Related Health Effects in the United States. *Environmental Health Perspectives*, **109**, 199-209.

Butler, J.H. 2000. Better budgets for methyl halides. *Nature*, **403**, 260-261.

Fioletov, V.E., B. McArthur, J. Kerr, and D. Wardle. 2000. Estimation of long-term changes in ultraviolet radiation over Canada. *Journal of Geophysical Research*, in press.

Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat. 2001. *Climate Change 2001, The Scientific Basis, Summary for Policymakers et Technical Summary of the IPCC WGI Third Assessment Report*. Genève : Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat.

Harvey, D. 2000. Global Warming: The Hard Science. Toronto: Prentice Hall.

Labitzke, K and B. Naujokat. 2000. The lower arctic stratosphere in winter since 1952. *SPARC Newsletter*, No. 15, 11-14.

McArthur, L.J.B., V.E. Fioletov, J.B. Kerr, and D.I. Wardle. 1999. Derivation of UV-A irradiance from pyranometer measurements, Journal of Geophysical Research, **104**, 30139-30151.

Organisation météorologique mondiale, 1999. *Évaluation scientifique de l'appauvrissement de la couche d'ozone : 1998*. Genève : Organisation météorologique mondiale.

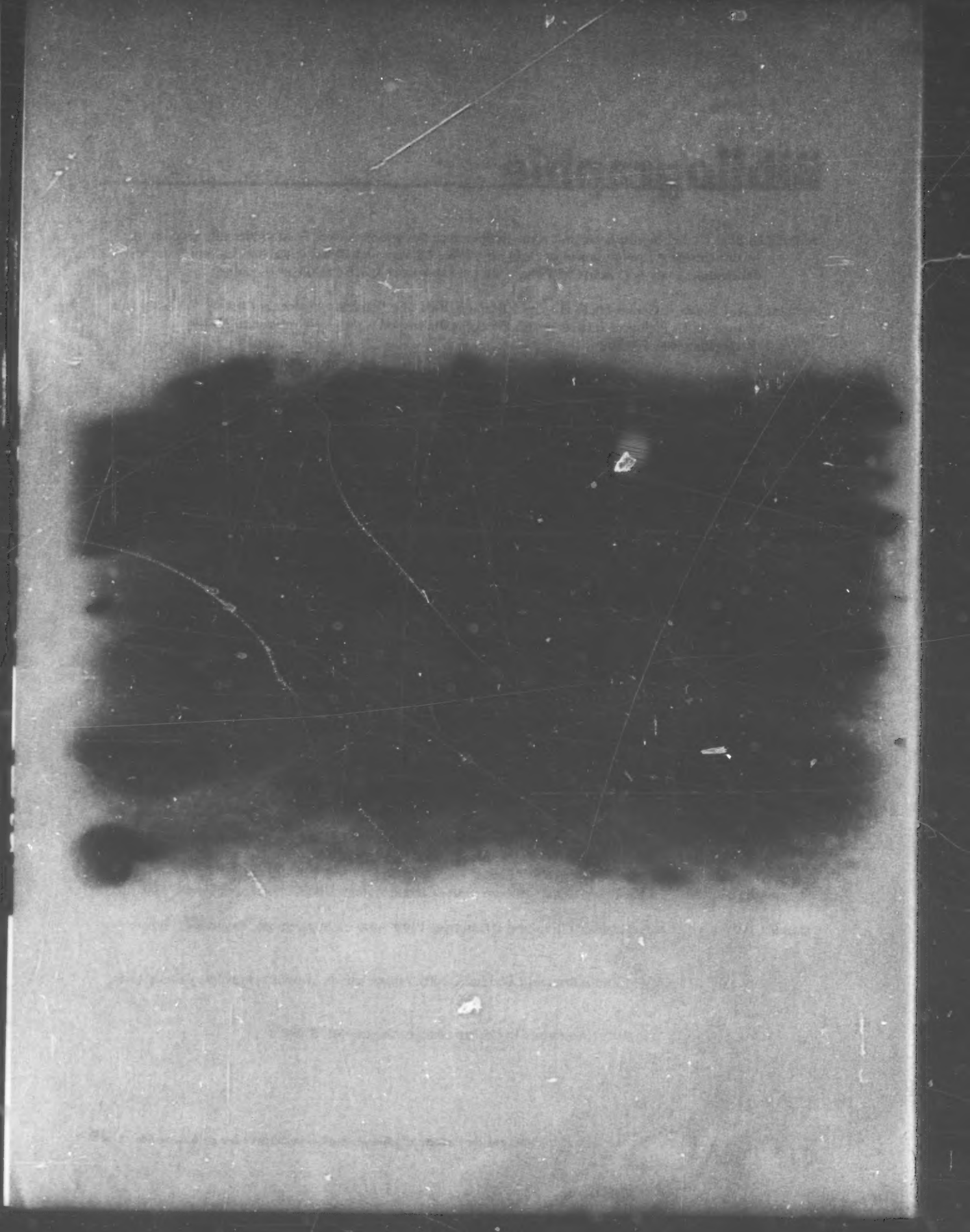
Rhew, R.C., B. Miller, and R.F. Weiss. 2000. Natural methyl bromide and methyl chloride emissions from coastal salt marshes. *Nature*, **403**, 292-295.

Rind, D., D. Shindell, P. Lonergan, N.K. Balachandran. 1998. Climate change and the middle atmosphere. Part III: The Doubled CO_2 Climate Revisited. *Journal of Climate*, **2**, 876-893.

Rind, D., R. Suozzo, N.K. Balachandran, and M.J. Prather. 1990. Climate change and the middle atmosphere. Part I: The doubled CO_2 Climate. Journal of the Atmospheric Sciences, **47**, 475-494.

Shepherd, T.G. 2000. On the role of the stratosphere in the climate system. *SPARC Newsletter*, No 14, 7-10.

Shindell, D., R. Rind, N. Balachandran, J. Lean, and P. Lonergan 1999. Solar cycle variability, ozone, and climate. *Science*, **284**, 305-308.

Staehelin, J., N.R.P. Harris, C. Appenzeller, and J. Eberhard. 2001. Ozone trends: A review. *Review of Geophysics*, **(2)**, 231-290.

[illegible] 2000. Uncertainty in climate change. *Nature*, **407**, 571-572.